

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIGITAL FIELDBUS  
FOUNDATION EN LA PLANTA DIDÁCTICA PARA FORMACIÓN REMOTA  
EN CONTROL DE PROCESOS Y SISTEMAS COMPUTARIZADOS, DEL  
CENTRO DE ELECTRICIDAD Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL (CEAI) –  
SENA REGIONAL VALLE**

**HELMAN MAURICIO GONZALEZ ROJAS**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMATICA Y ELECTRONICA  
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRONICA  
SANTIAGO DE CALI  
2008**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIGITAL FIELDBUS  
FOUNDATION EN LA PLANTA DIDÁCTICA PARA FORMACIÓN REMOTA  
EN CONTROL DE PROCESOS Y SISTEMAS COMPUTARIZADOS, DEL  
CENTRO DE ELECTRICIDAD Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL (CEAI) –  
SENA REGIONAL VALLE**

**HELMAN MAURICIO GONZALEZ ROJAS**

**Pasantia Para Optar Al Titulo De Ingeniero Electronico**

**Director  
WILLIAM GUTIÉRREZ MARROQUÍN  
Especialista en Automatización Industrial**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMATICA Y ELECTRONICA  
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRONICA  
SANTIAGO DE CALI  
2008**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado  
en cumplimiento de los requisitos  
exigidos por la Universidad  
Autónoma de Occidente para optar  
al título de Ingeniero Industrial**

**WILIAM GUITIERREZ MARROQUIN**  
\_\_\_\_\_  
**Director**

**CESAR VICTORIA**  
\_\_\_\_\_  
**Jurado**

**NEFTALY ROJAS**  
\_\_\_\_\_  
**Jurado**

**Santiago de Cali, 20 de febrero de 2009**

## **AGRADECIMIENTOS**

- Principalmente gracias a Dios por darme la oportunidad de poder realizar este proyecto de grado.
- Al SENA y el CEAI – Centro de Electricidad y Automatización Industrial por brindarme los laboratorios, equipos y capacitación necesarios para la implementación del proyecto. Y por su total financiación de los equipos utilizados en el proyecto.
- Al director de proyecto William Gutiérrez Marroquín Instructor de del CEAI y profesor de la faculta de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de Occidente.
- Gracias a Sincron por distribuirnos todos lo equipos para la implementación del proyecto y además por brindarnos la capacitación y certificación internacional de manejo, montaje y configuración de Equipos y Software de la multinacional fabricante de equipos para automatización y comunicación industrial, SMAR.

## CONTENIDO

	Pag.
GLOSARIO	15
RESUMEN	17
INTRODUCCION	18
1. JUSTIFICACION	20
2. ANTECEDENTES	22
3. MARCO TEORICO	23
3.1 BUSES DE CAMPO	23
3.2 BUSES DE CAMPO EXISTENTES	24
3.2.1 Buses de alta velocidad y baja funcionalidad	24
3.2.2 Buses de alta velocidad y funcionalidad media	24
3.2.3 Buses de altas prestaciones	25
3.3 ALGUNOS BUSES ESTANDARIZADOS	26
3.3.1 Profibus	26
3.3.2 ControlNet	26
3.3.3 DeviceNet	26
3.3.4 Foundation Fieldbus	27
3.4 TRANSMISORES	27
4. RECONOCIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA	29

4.1 DIAGRAMA DE PROCESOS E INSTRUMENTACIÓN	30
4.2 DIAGRAMA DE FUERZA	31
5. INTRODUCCION A FOUNDATION FIELDBUS	33
5.1 ¿QUIEN ES?	33
5.2 ¿QUE ES?	33
5.3 DESCRIPCIÓN DE FOUNDATION FIELDBUS	35
5.3.1 Bloques de recursos (Resource Block)	36
5.3.2 Bloques de transductor (Transducer Block)	36
5.3.3 Bloques funcionales (Function Blocks)	37
5.3.4 Estándares Definidos por Fieldbus Foundation	39
5.3.5 H1	39
5.3.6 HSE	40
5.4 MODELO DE COMUNICACIONES FIELDBUS FOUNDATION	40
5.4.1 H1	40
5.4.2 Especificaciones comunes	45
5.4.3 HSE	46
6. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y GENERALES DEL SOFTWARE, DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS	48
6.1 SOFTWARE PARA PROGRAMACIÓN DE LOS SISTEMAS FIELDBUS FOUNDATION	48
6.1.1 System302	48
6.1.2 Syscon	49
6.1.3 ProcessView	50
6.1.4 GraphWorx	50

6.1.5 Alarmworkx32	50
6.1.6 Trendworx32	50
6.2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS (TRANSMISORES Y ACTUADORES)	51
6.2.1 Instrumentos de temperatura	51
6.2.2 Instrumentos de presión	54
6.2.3 Instrumentos conversores	58
6.2.4 Puente Universal Fieldbus (DFI302)	60
6.2.5 Terminador de RED BT302	63
7. COSTOS DEL SOFTWARE, DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	64
8. MONTAJE E INSTALACIÓN DEL SISTEMA BUS DE CAMPO FIELDBUS FOUNDATION	65
8.1 INSTALACIÓN DE LA RED HSE	65
8.2 INSTALACIÓN DE LA RED H1	65
8.3 TOPOLOGÍA UTILIZADA PARA LA CONEXIÓN DE LOS TRANSMISORES	66
8.4 CONEXIÓN E INSTALACIÓN DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS FIELDBUS	67
8.4.1 Dispositivo de enlace de datos (DFI302)	67
8.4.2 Transmisor de Presión (LD302)	70
8.4.3 Transmisor de Temperatura (TT302)	71
8.4.4 Conversor de Fieldbus Foundation a 4 – 20mA (FI302)	72
8.4.5 Dispositivo terminador de Red BT302	73
8.5 INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE SYSTEM302	73

8.5.1 Ejemplo de Configuración e Implementación De una estrategia de control en System302	74
9. ESTRATEGIAS DE CONTROL CORRIENDO EN LA PLANTA DIDÁCTICA	83
9.1 ESTRATEGIA 1, CONTROL DE FLUJO	84
9.1.1 Desarrollo de la estrategia	84
9.1.2 Configuración física y lógica de la estrategia	84
9.1.3 Sistema de Supervisión	87
9.1.4 Sintonía del controlador	88
9.1.5 Calculo de sintonía	89
9.1.6 Criterios de desempeño	91
9.1.7 Identificación del sistema	91
9.2 ESTRATEGIA 2, CONTROL DE NIVEL	91
9.2.1 Desarrollo de la estrategia	91
9.2.2 Configuración física y lógica de la estrategia	92
9.2.3 Sistema de Supervisión	94
9.2.4 Calculo de sintonía	95
9.2.5 Criterios de desempeño	96
9.2.6 Identificación del sistema	97
9.3 ESTRATEGIA 3, CONTROL EN CASCADA	99
9.3.1 Desarrollo de la estrategia	99
9.3.2 Configuración física y lógica de la estrategia	99
9.3.3 Configuración del Sistema de Supervisión	104
9.3.4 Criterios de desempeño	106
9.3.5 Identificación del Sistema	106



10. CONCLUSIONES	107
11. RECOMENDACIONES	110
BIBLIOGRAFIA	111
ANEXOS	113

## LISTADO DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
Tabla 1. Descripción de los elementos de la Figura 3	32
Tabla 2. Tipos de bloques funcionales para Fieldbus Foundation	37
Tabla 3. Especificaciones funcionales de TT302	54
Tabla 4. Especificaciones funcionales de LD302	58
Tabla 5. Especificaciones funcionales de FI302	59
Tabla 6. Especificaciones técnicas y funcionales del DFI302	62
Tabla 7. Especificaciones técnicas del BT302	63
Tabla 8. Resumen económico de la propuesta	64
Tabla 9. Parametrización de los bloques funcionales	76
Tabla10. Parametrización de los bloques funcionales de la estrategia 1	85
Tabla 11. Parámetros, Criterios de desempeño de control de la estrategia 1	91
Tabla 12. Parametrización de los bloques funcionales de la estrategia 2	93
Tabla13. Parámetros, criterios de desempeño de control de la estrategia 2	97
Tabla 14. Parametrización de los bloques funcionales de la Estrategia 3	101
Tabla15. Parámetros, criterios de desempeño de control de la estrategia 3	106

## LISTADO FIGURAS

	<b>Pag.</b>
Figura1. Representación física de la planta didáctica y esquema de supervisión.	30
Figura 2. Diagrama P&ID de la planta didáctica	31
Figura 3 Diagrama de fuerza de la planta	32
Figura 4. Logo que llevan los dispositivos o instrumentos aprobados por la fundación Fieldbus	34
Figura 5. Modelo de comunicaciones Fieldbus Foundation	41
Figura 6. Algunas topologías soportadas por el protocolo Fieldbus Foundation	42
Figura 7. Tiempos absolutos de inicio de programa de enlace	44
Figura 8 Sensor de temperatura (RTD)	52
Figura 9. Representación física del TT302	52
Figura10. Sensor capacitivo (Célula Capacitiva)	54
Figura 11. Representación física del TT302	56
Figura 12. Representación física del FI302	58
Figura 13. Representación física del DFI302	61
Figura 14. Cable UTP para la red HSE	65
Figura 15. Topología de bus utilizada en el proyecto y red de comunicación	66
Figura 16. Representación física de Racks DF1	67
Figura 17. Conexión de los módulos en el Rack	68
Figura 18. Conexión eléctrica y configuración manual del DFI302	69
Figura 19. Conexión eléctrica del transmisor LD302	70

Figura 20. Montaje del transmisor	70
Figura 21. Conexión eléctrica del transmisor TT302	71
Figura 22. Conexión eléctrica del sensor RTD en el transmisor TT302	71
Figura 23. Conexión eléctrica del conversor FI302	72
Figura 24. Conexión de los canales del FI302	73
Figura 25. Conexión del terminador de red BT302	73
Figura 26. Esquema P&ID del ejemplo de la estrategia	74
Figura 27. Proyecto realizado en SYSCON 7.1	75
Figura 28. Enlace de bloques funcionales para la estrategia de control en SYSCON	77
Figura 29. Arquitectura del sistema de supervisión	79
Figura 30. Base de Datos del OPC Server	80
Figura 31. Pantalla principal del sistema de supervisión	82
Figura 32. Esquema P&ID de una sección de la planta	83
Figura 33. Configuración física y lógica de la estrategia 1	85
Figura 34. Implementación de la estrategia 1	87
Figura 35. Pantalla principal del sistema de supervisión	88
Figura 36. Sintonía del controlador	89
Figura 37. Sistema oscilando	89
Figura 38. Sistema Sintonizado	90
Figura 39. Configuración física y lógica de la estrategia 2	92
Figura 40. Implementación de la estrategia 2	94
Figura 41. Pantalla principal del sistema de supervisión	95
Figura 42. Respuesta del sistema en la Estrategia 2	96

Figura 43. Alarmas configuradas en la Estrategia 2	97
Figura 44. Reportes de alarmas y eventos de la Estrategia 2	98
Figura 45. Configuración física y lógica de la estrategia 3	100
Figura 46. Implementación de la estrategia 3	104
Figura 47. Pantalla principal del sistema de supervisión	105
Figura 48. Respuesta del sistema en la Estrategia 3	105
Figura 49. Envío y captura de datos para validación del sistema de la estrategia 2	113
Figura 50. Configuración del Ident para la estimación del sistema	114
Figura 51. Modelo de salida	114
Figura 52. Índices de desempeño del controlador de la estrategia 2	116

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pag.</b>
Anexo A. identificación del sistema	113
Anexo B. índices de desempeño	116

## GLOSARIO

**ASN. 1:** es un estándar, para a descripción de estructuras de representación, codificación e transmisión de datos, independientemente de la máquina que se este usando en sus formas de representación internas.

**CCITT:** son las siglas de Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico antiguo nombre del comité de normalización de las telecomunicaciones dentro de la UIT.

**CABLE UTP:** es un tipo de cableado utilizado principalmente para comunicaciones. Se encuentra normalizado de acuerdo a la norma Americana TIA/EIA-568-B y a la internacional ISO-11801.

**ELECTROVALVULA:** una electroválvula es un dispositivo diseñado para controlar el flujo de un fluido a través de un conducto como puede ser una tubería.

**FIRMWARE:** sistema operativo del los procesadores de cada uno de los dispositivos de campo.

**FLUJO:** caudal es la cantidad de fluido que pasa por determinado elemento en la unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

**HMI:** interface hombre maquina, es una interfaz de usuario, es el medio con que el usuario puede comunicarse con una máquina, un equipo o una computadora, y comprende todos los puntos de contacto entre el usuario y el equipo.

**ISA:** es una sociedad de ingenieros, técnicos, comerciantes, educadores y estudiantes, creada como «Instrumentation Society of America» el 28 de abril de 1945, en Pittsburg, EE.UU.

**ISO:** la Organización Internacional para la Estandarización o ISO (en inglés, International Organization for Standardization), que nace después de la Segunda Guerra Mundial (fue creada el 23 de febrero de 1947), es el organismo encargado de promover el desarrollo de normas internacionales de fabricación, comercio y comunicación para todas las ramas industriales a excepción de la eléctrica y la electrónica.

**NIVEL:** variables o magnitud física que representa el estado de cantidad de un líquido dentro de un tanque, embalse, etc.

**PID:** es una acción de control por realimentación que se utiliza en sistemas de control industriales. Un controlador PID corrige el error entre un valor medido y

el valor que se quiere obtener calculándolo y luego sacando una acción correctora que puede ajustar al proceso acorde.

**KP:** ganancia, parámetro de controlador PID.

**RED:** es un conjunto de equipos (computadoras y/o dispositivos) conectados por medio de cables, señales, ondas o cualquier otro método de transporte de datos, que comparten información (archivos), recursos y servicios.

**SENSOR:** un sensor es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas.

**SMAR:** empresa multinacional, fabricante de equipos para Automatización Industrial.

**OPC:** el OPC (OLE for Process Control) es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos. Este estándar permite que diferentes fuentes envíen datos a un mismo servidor OPC, al que a su vez podrán conectarse diferentes programas compatibles con dicho estándar. De este modo se elimina la necesidad de que todos los programas cuenten con drivers para dialogar con múltiples fuentes de datos, basta que tengan un driver OPC.

**OSI:** el modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, Open System Interconnection) lanzado en 1984 fue el modelo de red descriptivo creado por ISO; esto es, un marco de referencia para la definición de arquitecturas de interconexión de sistemas de comunicaciones.

**SUPERVISION:** es la actividad de apoyar y vigilar la coordinación de actividades de tal manera que se realicen en forma satisfactoria.

**TRANSMISOR:** un transmisor es un equipo que emite una señal, código o mensaje a través de un medio.

**TEMPERATURA:** la temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de calor o frío.

**TI:** tiempo integral, parámetro del controlador PID.

**TD:** tiempo derivativo, parámetro del controlador PID.



## RESUMEN

En el presente proyecto se hará un estudio y recopilación del sistema de comunicación industrial Fieldbus Foundation, con el fin de disponer de una plataforma de formación en buses de campo y poder brindar soluciones eficientes de automatización y control a las empresas e industrias de la región, en el presente proyecto se abordaran las nuevas posibilidades que ofrece el sistema o protocolo de comunicación industrial Fieldbus Foundation, para ello este sistema se implementará sobre la planta didáctica para formación remota en control procesos y sistemas computarizados del Centro de Electricidad y Automatización Industrial – CEAI del SENA. Con el fin de correr estrategias de control que permita controlar diferentes tipos de variables físicas tales como, nivel, flujo, presión y temperatura, haciendo de la planta didáctica un ambiente semejante a un entorno industrial. De igual forma se diseñará una interfaz supervisión o una Interfaz Hombre Maquina (HMI) que permita gestionar todo el sistema implementado, incluyendo el estado del software y hardware del sistema o la red industrial, y así poder demostrar los beneficios y ventajas que conlleva el utilizar la tecnología Fieldbus Foundation.

Se hará énfasis en la construcción de estrategias de control que permitan ser distribuidas a través de todos los dispositivos de campo, además se obtendrán los índices de desempeño de los controladores que se utilicen en las estrategias, con el fin de tener y lograr la mejor eficiencia de los controladores.

También se tienen en cuenta las ventajas que tiene la tecnología Fieldbus Foundation con respecto a otras tecnologías para control a través de redes de comunicación industrial.

El objetivo principal del proyecto es: Diseñar e implementar una red de comunicación industrial o sistema de control distribuido bajo un sistema de bus de campo que funcione sobre tecnología Fieldbus Foundation, en la planta didáctica para formación remota en control de procesos y sistemas computarizados.

## INTRODUCCIÓN

El ambiente operativo de las industrias ha cambiado notablemente en los últimos años. Los métodos de automatización para el control de los procesos industriales han ido evolucionando tecnológicamente gracias a los grandes avances que se han presentado en los campos de la electrónica, el control, las redes y las telecomunicaciones.

La incorporación masiva de microprocesadores en la instrumentación ha llegado al punto de plantearse no sólo la utilización de buses de campo con protocolos de comunicación digital y presentación elaborada de valores de campo (status para diagnósticos, variables secundarias y calibración), sino también la inclusión de las estrategias de control en campo, eliminando así los tradicionales sistemas de control distribuido.

En cuanto al software y el contexto de los protocolos de comunicación en el nivel de aplicación, la orientación a objeto, bien ha dado lugar a bloques funcionales capaces de conectarse entre sí para implementar y correr las distintas estrategias. Son estos bloques localizados en los dispositivos los que permiten la comunicación entre ellos en unos casos o a hacerlo de forma interna en otros, pero siempre de forma transparente y permitiendo reubicaciones en caso de necesidad. Por esta razón en el mercado mundial se ofrecen distintos tipos de soluciones para automatización, las cuales pueden cumplir con algunas exigencias de las grandes y pequeñas industrias de la región, donde se pretenden suplir necesidades como: reducción de costos, confiabilidad, interoperabilidad, flexibilidad, seguridad, etc.

Una de las tecnologías que más se utilizan en las industrias para el control de procesos son los buses de campo, donde se cuenta con una gran variedad de tipos de buses con diferentes características de funcionamiento tales como tecnologías usadas, protocolos de comunicación, interoperabilidad entre otras.

Con el fin de lograr y comprobar el funcionamiento de los buses de campo que se utiliza en la industria, se implementará sobre la planta didáctica para formación remota en control de procesos y sistemas computarizados del SENA – CEAI, un sistema de control distribuido Fieldbus Foundation (FF), el cual aparece como una alternativa prometedora y que recoge esta evolución. Como primera ventaja cabe destacar su carácter de protocolo abierto con una especificación a disposición de cualquier equipo de desarrollo. De hecho, algunos niveles ya aprobados disponen de varias implementaciones alternativas que garantizan la interoperabilidad.

Además de implementar un sistema de control que aproveche todas las posibilidades que provee el sistema FF, se propone desarrollar una interfaz

gráfica que permita, con los niveles de seguridad y tratamiento de alarmas requeridos, supervisar un proceso industrial.

De esta manera podremos disponer de una plataforma de formación en buses de campo, la cual puede brindar soluciones de automatización y control en las empresas e industrias de la región.

Con la realización de este proyecto, se realizarán y cumplirán los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre los buses de campo.
- Determinar las características principales del Fieldbus Foundation.
- Realizar la implementación de sistemas de bus de campo (Fieldbus Foundation) en la planta didáctica para formación remota en control de procesos y sistemas automatizados.
- Diseñar e implementar estrategias de control mediante el sistema de bus de campo (Fieldbus Foundation).
- Indicar los beneficios y ventajas que atrae implementar todo un sistema de bus de campo que trabaja bajo tecnología de Fieldbus Foundation.

## 1. JUSTIFICACION

El sistema de bus de campo o sistema de control de campo (FCS) que se va a implementar en la planta didáctica para formación remota en control de procesos y sistemas computarizados, hace parte de un sistema de control Fieldbus llamado System302 el cual fue creado por el gigante Brasileiro **Smar**.

La implementación de una nueva tecnología en buses de campo, en la planta didáctica, en primera instancia permitirá que el Centro de Electricidad y Automatización Industrial disponga de una plataforma totalmente equipada para realizar estudios y encontrar soluciones de control y automatización totalmente innovadoras, además en lo pertinente a la educación se podrá incluir en el programa de formación de tecnólogos en automatización industrial, una capacitación en buses de campo Fieldbus Foundation, donde los estudiantes aprenderán las ventajas y beneficios que conllevan el utilizar este sistema para controlar procesos industriales.

Dentro de las ventajas y beneficios que podrán encontrar los estudiantes al utilizar el bus de campo Fieldbus Foundation como posible solución para el desarrollo de estrategias de control y como solución para las industrias de la región, teniendo en cuenta las ventajas que expresa la empresa SMAR en su página Web:

- **Menor Costo:** El System302 no necesita del hardware existente en los sistemas DCS. Se tiene ahí una importante reducción del número de controladores y subsistemas de entrada/salida, ya que los instrumentos digitales Fieldbus son conectados con las estaciones de trabajo a través de una red digital. Los instrumentos Fieldbus también son capaces de realizar funciones de control y cálculos complejos, reduciendo notablemente los gastos en tarjetas de control y cableado. A todo esto se suma la disminución de las horas de ingeniería y la economía en la instalación de cables, con lo que el costo del proyecto completo tendrá una reducción considerable.
- **Flexibilidad:** El sistema System302 permite suplir la necesidad de implementar modificaciones, expansiones y configuraciones tanto de instrumentación, comunicación y control de procesos dentro de la planta. Se puede implementar una gran variedad de opciones de interfaces y la utilización de tecnología de redes sobre la planta. Nuevas estrategias de control pueden ser rápidamente implementadas, probadas e integradas desde cualquier estación de trabajo unida a la red. También es posible la selección y el uso instantáneo de fórmulas y recetas.
- **Interoperabilidad:** según SMAR en su documento en la WEB “la interoperabilidad proporcionada por Fieldbus Foundation da la libertad de elegir dispositivos fabricados por diferentes proveedores. Como Fieldbus es una norma internacional abierta, los equipos con certificado FF (**Fieldbus Foundation**) de cualquier fabricante puede ser interconectado sin problema. De esta manera podemos incorporar la tecnología ya existente en la planta con la nueva tecnología de Fieldbus Foundation.

- **Menor costo de expansión y modificación:** según SMAR en su documento en la WEB la versatilidad de la arquitectura de Fieldbus reduce la necesidad de subsistemas de entrada/salida, y hace más fácil la expansión del sistema. Un sistema implementado con Fieldbus Foundation puede ser de cualquier tamaño, desde un lazo de control a miles de lazos, o más.
- **Mayor seguridad:** según SMAR en su documento en la WEB “Los diagnósticos de Fieldbus no sólo son comunicados a los operadores de planta, también son usados por los propios dispositivos. Esto garantiza paradas de proceso en condiciones más adecuadas, sin la necesidad de la acción de controladores de alto nivel<sup>1</sup>.

En síntesis gracias a todas estas ventajas del sistema Fieldbus podemos diseñar, ejecutar y correr sobre la planta todo tipo de estrategias de control y así poder disponer de una plataforma altamente actualizada con las últimas tecnologías y dispositivos de las redes de comunicación industrial, para formación en bus de campo y además poder generar soluciones optimas de automatización en las empresas e industria de la región.

---

<sup>1</sup> System302 [en línea]. Sao Paulo Brasil: SMAR, 2003. [Consultado 5 de septiembre de 2008]. Disponible en Internet: [www.smar.com/PDFs/Catalogues/SYSTEM32CS.pdf](http://www.smar.com/PDFs/Catalogues/SYSTEM32CS.pdf) System302

## 2. ANTECEDENTES

En la industria en lo pertinente a la implementación de sistemas de redes de comunicación industrial, sistemas de control distribuido y buses de campo para el control de procesos, se han aplicado en las siguientes tecnologías, las cuales también se han implementado en la planta didáctica para formación remota en control de procesos y sistemas computarizados:

- **ControlNet.** Permite en la planta reducir el cableado, ahorrar tiempo y costos de instalación y obtener valiosos diagnósticos sobre los diversos detectores, accionadores y otros dispositivos conectados al sistema de control. En el nivel de control este sistema a ofrecido un rendimiento de E/S determinista y repetible, así como programación y comunicación entre dispositivos similares y recopilación de datos; asimismo, abarca todo el proceso para el control de variables físicas que se manejen en la planta.

- **DeviceNet.** Permite en la planta una comunicación económica para conectar los dispositivos industriales (tales como los interruptores de final de carrera, detectores fotoeléctricos, múltiples de válvulas, arrancadores de motor, botones pulsadores, lectores de códigos de barras, variadores de frecuencia ajustable, pantallas e interfase de operador) a una red y eliminar el costoso cableado que demanda mucho tiempo.

- **PLCs y red Ethernet.** Los PLCs también son implementados para el control de la planta, en los cuales son programadas las estrategias de control deseadas. Los diversos buses de campo que se han implementado para el control de la planta como ControlNet y DeviceNet han adoptado Ethernet como la red apropiada para los niveles superiores. Este tipo de red se implementa para la transferencia de datos a alta velocidad entre varios computadores, para la supervisión, gestión y control de toda la planta.

Estos sistemas de comunicación industrial han sido probados y estudiados en la planta didáctica, obteniendo así buenos resultados para el control remoto, permitiendo poder encontrar soluciones sofisticadas de automatización para las industria y empresas que han adoptado dichas tecnologías.

Por lo tanto con ControlNet y DeviceNet se han realizados proyectos para el control de procesos industrias en la fabricación de productos e insumo, pero de igual forma por parte de las empresas, siguen surgiendo necesidades debido a algunas desventajas que presentan estas tecnologías.

### **3. MARCO TEÓRICO**

El Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), es una entidad de formación profesional integral, la cual dispone de una amplia infraestructura de talleres y laboratorios para beneficiar empresas de todos los niveles tecnológicos, el sector productivo e industrial. Esta entidad cuenta con diferentes centros de formación entre los cuales se destaca el centro de electricidad y automatización industrial CEAI, el cual cuenta con los más sofisticados y actualizados talleres y laboratorios para la formación profesional.

A nivel industrial uno de los campos más explotados e interesantes son las redes de comunicación industrial, y para suplir la formación de profesionales en este campo el CEAI tiene dentro de su infraestructura física laboratorios-taller de redes de comunicaciones industriales donde en uno de ellos se cuenta con la denominada planta didáctica para formación remota en control de procesos y sistemas computarizados.

#### **3.1. BUSES DE CAMPO**

Un bus de campo es un sistema de transmisión de información (datos) que simplifica enormemente la instalación y operación de máquinas y equipamientos industriales utilizados en procesos de producción. El objetivo de un bus de campo es sustituir las conexiones punto a punto entre los elementos de campo y el equipo de control a través del tradicional bucle de corriente de 4-20mA. Típicamente son redes digitales, bidireccionales, multipunto, montadas sobre un bus serie, que conectan dispositivos de campo como PLCs, transductores, actuadores y sensores. Cada dispositivo de campo incorpora cierta capacidad de proceso, que lo convierte en un dispositivo inteligente, manteniendo siempre un costo bajo. “Cada uno de estos elementos será capaz de ejecutar funciones simples de diagnóstico, control o mantenimiento, así como de comunicarse bidireccionalmente a través del bus”<sup>2</sup>.

El objetivo es reemplazar los sistemas de control centralizados por redes de control distribuido para mejorar la calidad del producto, reducir los costos y mejorar la eficiencia. Para ello se basa en que la información que envían y/o reciben los dispositivos de campo es digital, lo que resulta mucho más preciso que si se recurre a métodos analógicos. Además, cada dispositivo de campo es un dispositivo inteligente y puede llevar a cabo funciones propias de control, mantenimiento y diagnóstico. De esta forma, cada nodo de la red puede informar en caso de fallo del dispositivo asociado, y en general sobre cualquier anomalía asociada al dispositivo. Esta monitorización permite aumentar la

---

<sup>2</sup> KASCHEL, Héctor y PINTO, Ernesto. Análisis del estado del arte de los buses de campo aplicados al control de procesos industriales [en línea]. Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile, 2003. [Consultado el 6 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://cabierta.uchile.cl/revista/19/articulos/pdf/edu3.pdf>

eficiencia del sistema y reducir la cantidad de horas de mantenimiento necesarias.

### 3.2. BUSES DE CAMPO EXISTENTES

Debido a la falta de estándares, diferentes compañías han desarrollado diferentes soluciones, cada una de ellas con diferentes prestaciones y campos de aplicación. En una primera clasificación tenemos los siguientes grupos, esos son citados por el tutorial sobre Fieldbus de Guillermo Tejada Muñoz:

**3.2.1 Buses de alta velocidad y baja funcionalidad.** “Están diseñados para integrar dispositivos simples como finales de carrera, fotocélulas, relés y actuadores simples, funcionando en aplicaciones de tiempo real, y agrupados en una pequeña zona de la planta, típicamente una máquina. Básicamente comprenden las capas física y de enlace del modelo OSI, es decir, señales físicas y patrones de bits de las tramas”<sup>3</sup>.

Algunos ejemplos son:

- CAN: Diseñado originalmente para su aplicación en vehículos.
- SDS: Bus para la integración de sensores y actuadores, basado en CAN
- ASI: Bus serie diseñado por Siemens para la integración de sensores y actuadores.

**3.2.2 Buses de alta velocidad y funcionalidad media.** Así mismo tejada afirma que:

Se basan en el diseño de una capa de enlace para el envío eficiente de bloques de datos de tamaño medio. Estos mensajes permiten que el dispositivo tenga mayor funcionalidad de modo que permite incluir aspectos como la configuración, calibración o programación del dispositivo. Son buses capaces de controlar dispositivos de campo complejos, de forma eficiente y a bajo costo. Normalmente incluyen la especificación completa de la capa de aplicación, lo que significa que se dispone de funciones utilizables desde programas basados en PCs para acceder, cambiar y controlar los diversos dispositivos que constituyen el sistema. Algunos incluyen funciones estándar para distintos tipos de dispositivos (perfiles) que facilitan la inter-operabilidad de dispositivos de distintos fabricantes<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> TEJADA MUÑOZ, Guillermo. Tutorial de Fieldbus [en línea]. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2007. [Consultado el 20 de agosto del 2008]. Disponible en Internet:

[http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb\\_1998/Pdf/04\\_tut.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb_1998/Pdf/04_tut.pdf)

<sup>4</sup>KASCHEL y PINTO, Op. cit., Disponible en Internet: <http://cabierta.uchile.cl/revista/19/articulos/pdf/edu3.pdf>



Algunos ejemplos son:

- DeviceNet: Desarrollado por Allen-Bradley, utiliza como base el bus CAN, e incorpora una capa de aplicación orientada a objetos.
- DIN MessBus: Estándar alemán de bus de instrumentación, basado en comunicación RS-232.
- InterBus-S: Bus de campo alemán de uso común en aplicaciones medias.

### **3.2.3 Buses de altas prestaciones.** Retomando a Tejada:

Son capaces de soportar comunicaciones a nivel de todos los niveles de la pirámide de comunicaciones industriales CIM. Aunque se basan en buses de alta velocidad, algunos presentan problemas debido a la sobrecarga necesaria para alcanzar las características funcionales y de seguridad que se les exigen. La capa de aplicación tiene un gran número de servicios a la capa de usuario, habitualmente un subconjunto del estándar MMS (Manufacturing Message Specification)<sup>5</sup>.

Entre sus características incluyen:

- Redes multi-maestro con redundancia.
- Comunicación maestro-esclavo según el esquema pregunta-respuesta.
- Recuperación de datos desde el esclavo con un límite máximo de tiempo.
- Capacidad de direccionamiento unicast, multicast y broadcast.
- Petición de servicios a los esclavos basada en eventos.
- Comunicación de variables y bloques de datos orientada a objetos.
- Descarga y ejecución remota de programas.
- Altos niveles de seguridad de la red, opcionalmente con procedimientos de autenticación.
- Conjunto completo de funciones de administración de la red.

Algunos ejemplos son:

- Profibus.
- WorldFIP.

---

<sup>5</sup> Ibíd., Disponible en Internet: <http://cabierta.uchile.cl/revista/19/articulos/pdf/edu3.pdf>

- Fieldbus Foundation.

### 3.3. ALGUNOS BUSES ESTANDARIZADOS

**3.3.1. Profibus.** “Profibus se desarrolló bajo un proyecto financiado por el gobierno alemán. Está normalizado en Alemania por DIN E 19245 y en Europa por E 50170. El desarrollo y posterior comercialización ha contado con el apoyo de importantes fabricantes como ABB, AEG, Siemens, Klöckner-Moeller. Está controlado por la PNO (Profibus User Organisation) y la PTO (Profibus Trade Organisation)”<sup>6</sup>.

Existen tres perfiles:

- Profibus DP (**Decentralized Periphery**). Orientado a sensores/actuadores enlazados a procesadores (PLCS) o terminales.
- Profibus PA (**Process Automation**). “Para control de proceso y cumpliendo normas especiales de seguridad para la industria química.
- Profibus FMS (**Fieldbus Message Specification**). “Para comunicación entre células de proceso o equipos de automatización. La evolución de Profibus hacia la utilización de protocolos TCP/IP para enlace al nivel de proceso hace que este perfil esté perdiendo importancia.”

**3.3.2. ControlNet.** Bus de alta velocidad (5 Mbps) y distancia (hasta 5 Km), muy seguro y robusto promovido por Allen-Bradley. Utiliza cable RG6/U (utilizado en televisión por cable) y se basa en un controlador ASIC de Rockwell. “No es soportado por muchos fabricantes y resulta de elevado precio por nodo. Se ha utilizado para interconexión de redes de PLCs y computadores industriales en aplicaciones de alta velocidad y ambientes muy críticos”<sup>7</sup>.

**3.3.3 DeviceNet.** Bus basado en CAN. Su capa física y capa de enlace se basan en ISO 11898, y en la especificación de Bosh 2.0. DeviceNet define una de las más sofisticadas capas de aplicaciones industriales sobre bus CAN.

DeviceNet fue desarrollado por Allen-Bradley a mediados de los noventa, posteriormente pasó a ser una especificación abierta soportada en la ODVA (Open DeviceNet Vendor Association). Cualquier fabricante puede asociarse a esta organización y obtener especificaciones, homologar productos, etc.

---

<sup>6</sup> Ibíd., Disponible en Internet: <http://cabierta.uchile.cl/revista/19/articulos/pdf/edu3.pdf>

<sup>7</sup> Ibíd., Disponible en Internet: <http://cabierta.uchile.cl/revista/19/articulos/pdf/edu3.pdf>

Es posible la conexión de hasta 64 nodos con velocidades de 125 Kbps a 500 Kbps en distancias de 100 a 500 m.

Utiliza una definición basada en orientación a objetos para modelar los servicios de comunicación y el comportamiento externo de los nodos. Define mensajes y conexiones para funcionamiento maestro-esclavo, interrogación cíclica, "strobing" o lanzamiento de interrogación general de dispositivos,

mensajes espontáneos de cambio de estado, comunicación uno-uno, modelo productor-consumidor, carga y descarga de bloques de datos y ficheros etc. DeviceNet ha conseguido una significativa cuota de mercado. Existen más de 300 productos homologados y se indica que el número de nodos instalados superaba los 300.000 en 1998, Está soportado por numerosos fabricantes: Allen-Bradley, ABB, Danfoss, Crouzet, Bosh, Control Techniques, Festo, Omron, etc.<sup>8</sup>.

**3.3.4 Foundation Fieldbus.** La Fundación Fieldbus es una organización que agrupa a más del 90% de los fabricantes y a los mayores usuarios de instrumentos de control en el mundo, dedicada al desarrollo de normas estandarizadas para el control digital de procesos industriales.

Esta desarrollada a partir del modelo de comunicaciones de siete niveles IS/OSI.

Es un protocolo para redes industriales, específicamente para aplicaciones de control distribuido. Puede comunicar grandes volúmenes de información, ideal para aplicaciones con varios lazos complejos de control de procesos y automatización de la fabricación.

Provee bloques de función: IA, ID, OA, OD, PID, que pueden intercambiarse entre la estación maestra (Host) y los dispositivos de campo. La longitud máxima por mensaje es de 256 bytes, lo que permite transferir funciones de control con el concepto de objetos.

Podría pensarse que en el sistema Fieldbus simplemente se está reemplazando una señal de corriente de 4-20 mA, por una señal digital. No es así. Por medio de la comunicación digital se permite enviar no sólo una señal de medición o control, se logra transmitir también importante información de diagnóstico que facilita el trabajo de mantenimiento y da mayor seguridad al sistema, alarmas, parámetros de control, etc. Además, siendo la comunicación bi-direccional se facilitan las labores de configuración y calibración.

### 3.4. TRANSMISORES

Llamado también elemento de transmisión, convierte la señal de salida de los elementos primarios de medida en señales normalizadas (3 - 15 PSI) o (4 –

---

<sup>8</sup> Ibíd., Disponible en Internet: <http://cabierta.uchile.cl/revista/19/articulos/pdf/edu3.pdf>

20mA), y la transmite al centro de control, a cualquier indicador, registrador o controlador que lo requiera. Algunas veces se emplean señales electrónicas de 1 a 5 mA CC; de 10 a 50 mA CC y de 0 a 20 mA CC.

#### 4. RECONOCIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La implementación del sistema Fieldbus Foundation se realiza en una planta didáctica que actualmente funciona para la formación de profesionales tecnólogos en automatización de procesos industriales y capacitación para operarios en manejo de tecnologías para el control de procesos, al igual que en ella se ejecutan y realizan estudios de diferentes tecnologías de automatización y se diseñan estrategias de control las cuales son adoptadas y utilizadas en las industrias.

En esta planta se puede realizar control de diferentes variables físicas, tales como: nivel, flujo, presión y temperatura. Para lograr este objetivo la planta dispone de ciertas características, tales como autoabastecimiento, de fácil transporte, permite el acceso remoto e incluye los siguientes equipos:

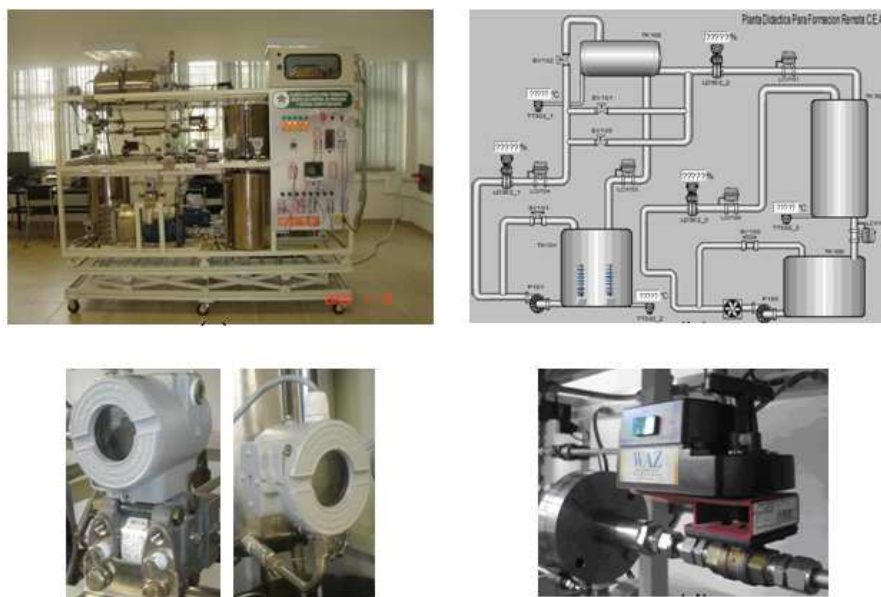
- 4 tanques de almacenamiento de agua.
- Instrumentos de medición: La planta está equipada con transmisores tipo Foundation Fieldbus Models de la serie 300, para la medición de flujo, nivel, temperatura y presión, las cuales se denotan como variables físicas involucradas en las actividades de aprendizaje como en actividades de la industria.
- Elementos finales de control: La planta dispone de válvulas electrónicas de control para la regulación de las variables físicas y válvulas solenoides que permiten direccionar el flujo ante determinadas necesidades. Funcionan con señales de 4 a 20mA y de 0 a 24VDC respectivamente.
- Bombas: Para suministrar el agua a los tanques de proceso se dispone de dos bombas eléctricas centrífugas a 220 VAC.
- Intercambiador de calor: En los procesos de temperatura es indispensable que el agua recupere su temperatura ambiente para lo cual se dispone de un intercambiador de calor.
- Resistencias calefactoras: En uno de los tanques de almacenamiento se dispone de un juego de resistencias calefactoras las cuales permiten elevar la temperatura del agua desde la temperatura ambiente hasta una temperatura de 60°C.
- Compresor: Este se utiliza para desplazar aire y poder presurizar uno de los tanques cerrados de la planta a una determinada presión.
- Panel frontal: las conexiones de cada uno de los instrumentos que dispone la planta didáctica llegan a un panel frontal. En este panel se encuentra también ubicado un registrador electrónico el cual permite visualizar el comportamiento

de las variables físicas en el tiempo, además se tienen pilotos de señalización para indicar sobre el estado de cada uno de los equipos de la planta como lo son las bombas, el compresor, el intercambiador de calor y las resistencias calefactores, además de un interruptor para paradas de emergencia.

- Armario de control de potencia: aquí se ubica el tablero de control el cual permite el intercambio de información entre los equipos de la planta y el DFI302. Además en este tablero se ubican los equipos de maniobra y protección necesarios para el correcto funcionamiento de la planta.

En la figura 1 podemos observar el esquema de toda la planta física, equipos que la componen tales como transmisores y elementos finales de control, de igual forma se presenta el bosquejo de una interfaz grafica la cual será utilizada para realizar el control, la gestión y supervisión de las variables que maneja la planta de manera remota.

**Figura1. Representación física de la planta didáctica y esquema de supervisión.**

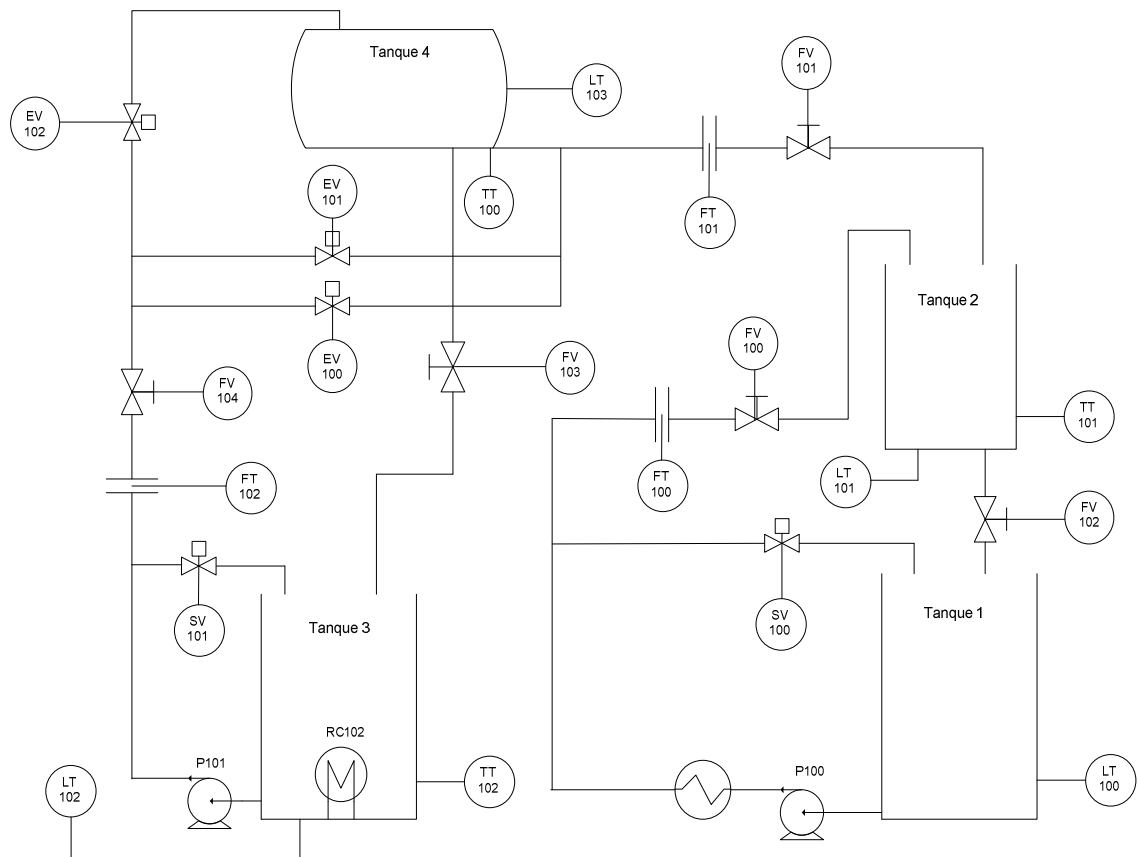


#### 4.1. DIAGRAMA DE PROCESOS E INSTRUMENTACIÓN

En la figura 2 se realiza el reconocimiento de la planta en cuanto a los equipos de instrumentación que intervienen en el funcionamiento de la misma.

Este diagrama nos permite mostrar el conjunto de elementos necesarios para conseguir el objetivo de control sobre una o más variables físicas determinadas, también nos indica los elementos que intervienen en las estrategias de control que diseñemos para correr en la planta.

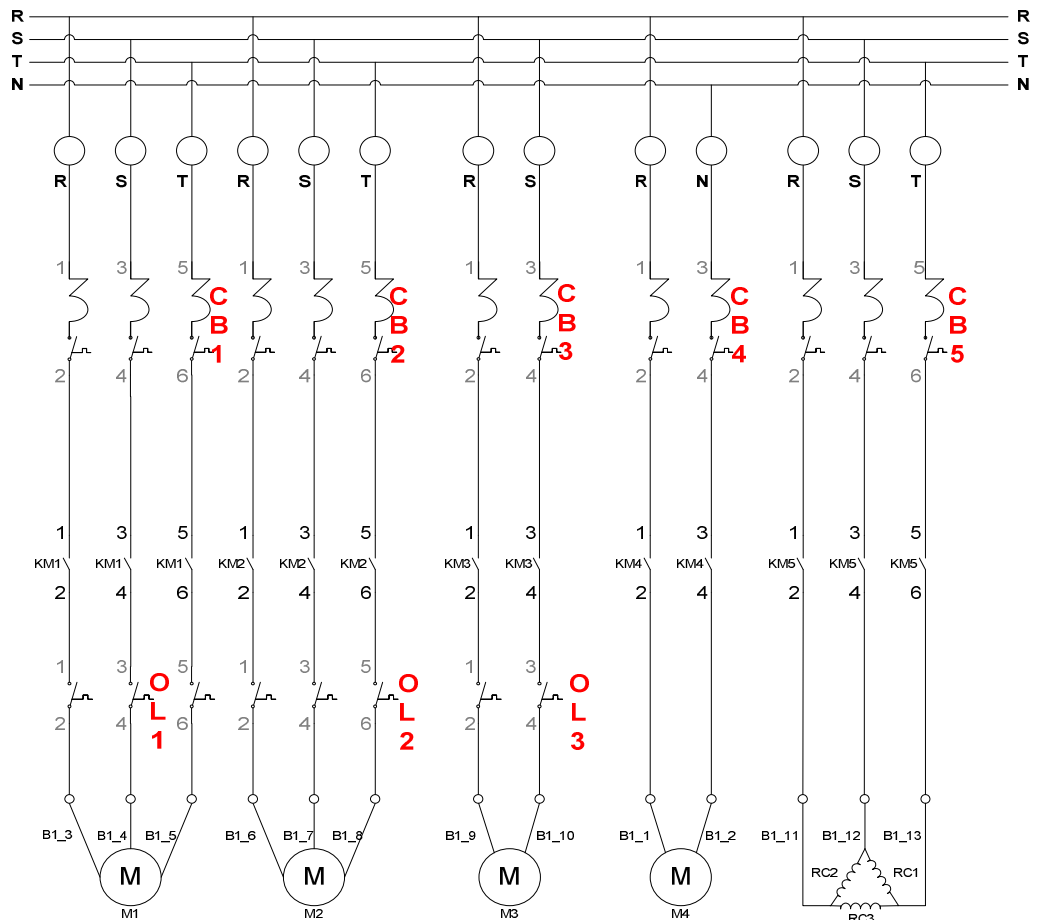
**Figura 2. Diagrama P&ID de la planta didáctica**



## 4.2. DIAGRAMA DE FUERZA

La planta dispone de un tablero de control que permite el intercambio de información entre los equipos y el DFI302, además este utiliza una interfaz de potencia en la cual se ubican los equipos de maniobra y protección necesarios para el correcto funcionamiento de la planta.

**Figura 3. Diagrama de fuerza de la planta**



**Tabla 1. Descripción de los elementos de la figura 3**

M1= MOTOR BOMBA P100, 3HP – 220/440 VAC	RC1= RESISTENCIA CALEFACTORA RC100, 220V / 6000W
M2= MOTOR BOMBA P101, 3HP – 220/440 VAC	RC2= RESISTENCIA CALEFACTORA RC100, 220V / 6000W
M3= MOTOR COMPRESOR CP100 250V – 20A	RC3= RESISTENCIA CALEFACTORA RC100, 220V / 6000W
M4= MOTOR VENTILADOR IC100, 110V – 150W	OL1= PROTECCION TERMICA TELEMECANIQUE / 5.5 / 8A, BOMBA P100
CB1= PROTECCION TERMOMAGNETICA TRIPOLAR, MERLIN GERIN / 6A – BOMBA P100	OL2= PROTECCION TERMICA TELEMECANIQUE / 5.5 / 8A, BOMBA P101
CB2= PROTECCION TERMOMAGNETICA TRIPOLAR, MERLIN GERIN / 10A – BOMBA P101	OL3=PROTECCION TERMICA TELEMECANIQUE / 1.6 / 2.5A, CP100
CB3= PROTECCION TERMOMAGNETICA TRIPOLAR, MERLIN GERIN / 16A – CP100	KM1= CONTACTO NA / CONTACTOR TRIPOLAR TELEMECANIQUE / LC1D09 – BOMBA P100
CB4= PROTECCION TERMOMAGNETICA TRIPOLAR, MERLIN GERIN / 16A – IC100	KM2= CONTACTO NA / CONTACTOR TRIPOLAR TELEMECANIQUE / LC1D09 – BOMBA P101
CB5= PROTECCION TERMOMAGNETICA TRIPOLAR, MERLIN GERIN / 63A – RC100	KM3= CONTACTO NA / CONTACTOR TRIPOLAR TELEMECANIQUE / LC1D09 – CP100
KM4= CONTACTO NA / CONTACTOR TRIPOLAR TELEMECANIQUE / LC1D09 – IC100	KM4= CONTACTO NA / CONTACTOR TRIPOLAR TELEMECANIQUE / LC1D09 – IC100



## 5. INTRODUCCION A FOUNDATION FIELDBUS

### 5.1. ¿QUIEN ES?

La Fieldbus Foundation fue creada como una organización independiente y sin ánimo de lucro para desarrollar un único bus de campo internacional, abierto e interoperable.

La organización se basa en los siguientes principios:

- La tecnología de FF ha de ser abierta y cualquier compañía ha de poder disponer de ella.
- La tecnología de FF ha de estar basada en los estándares de la IEC (International Electrotechnical Commission) y de ISA (International Standarization Association).
- Los miembros de la Fieldbus Foundation apoyan a los comités de estandarización nacional e internacional y trabajan con ellos.

La Fundación Fieldbus es una organización que agrupa a más del 90% de los fabricantes y a los mayores usuarios de instrumentos de control en el mundo, dedicada al desarrollo de normas estandarizadas para el control digital de procesos industriales.

### 5.2. ¿QUE ES?

“El Foundation Fieldbus es una arquitectura abierta para la integración total de la información. Se trata de un sistema de comunicaciones completamente digital, serie y bidireccional. Es un protocolo para redes industriales, específicamente para aplicaciones de control distribuido. Puede comunicar grandes volúmenes de información, ideal para aplicaciones con varios lazos complejos de control de procesos y automatización”<sup>9</sup>.

“FieldBus es un bus orientado sobre todo a la interconexión de dispositivos en industrias de proceso continuo. Su desarrollo ha sido apoyado por importantes fabricantes de instrumentación (Fisher-Rosemount, Foxboro, SMAR,...). En la actualidad existe una asociación de fabricantes que utilizan este bus, que

---

<sup>9</sup> FERNÁNDEZ, José Juan. Foundation Fieldbus y su aplicación a la alta velocidad HSE [en línea]. Sao Paulo: ETSI de Telecomunicaciones de Vigo, 2005. [Consultado el 30 de octubre del 2008]. Disponible en Internet:

[http://www.peirao.com/data/comun/documentos/jj/foundation\\_hse.pdf](http://www.peirao.com/data/comun/documentos/jj/foundation_hse.pdf)

gestiona el esfuerzo normalizado, la Foundation Fieldbus. Normalizado como ISA SP50, IEC-ISO 61158 ISA<sup>10</sup>.

El sistema de Foundation Fieldbus introduce el concepto de “interoperabilidad”. Con este término se describe la capacidad que tienen los instrumentos de diferentes fabricantes de comunicarse entre si y operar en forma armoniosa. Cualquier instrumento de cualquier fabricante, cuando tenga el Logotipo de aprobación FOUNDATION TM Fieldbus, tiene la garantía de interoperar con cualesquier otro instrumento que también cuenten con esa aprobación.

**Figura 4. Logo que llevan los dispositivos o instrumentos aprobados por la fundación Fieldbus**



**Fuente:** Sistemas de Control Fieldbus [en Línea]. Lima, Perú: Ricardo Jahncke S.A., 2006. [Consultado 08 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://isaperu.org/articles/fieldbus1.pdf>

Fieldbus es un sistema completo que posibilita la distribución de las funciones de control entre los equipos de campo, interconectando varios equipos, de tal forma que el usuario puede crear estrategias de control apropiadas para su aplicación tan solo enlazando bloques de función.

Algunas ventajas de las comunicaciones digitales son conocidas en los protocolos actuales de los transmisores inteligentes: alta precisión, acceso multivariáble, diagnóstico, configuración remota y “multi-drop” de varios equipamientos en un único par de hilos. Algunas características y ventajas de Fieldbus Foundation:

- Topología en bus o en árbol; se puede implementar distintas topologías para interconectar los dispositivos de campo, evitando errores y fallas en la comunicación.
- Los dispositivos de campo se alimentan y comunican a través del bus.
- Comunicación peer-to-peer; los dispositivos pueden comunicarse unos con otros sin necesidad de pasar por un ordenador, además se pueden configurar como maestros en la red.

---

<sup>10</sup> HERNANDEZ YANTÁ, Felicia. Interconexión de la Red de Computadoras con la Red Industrial Fieldbus Foundation [en línea]. Lima: ISA Peru, 2005. [Consultado el 30 de octubre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.cujae.edu.cu/eventos/cittel/trabajos/Trabajos/Comision%202/CITTEL-32.pdf>

- Transmisión de datos distribuida; se refiere a que los sensores (transmisores) y actuadores no solo actúan como tales, sino que pueden realizar funciones adicionales de comunicación y control.
- Es una tecnología orientada a objetos (con el concepto de bloques funcionales para la medida, control, regulación y diagnóstico), y la gestión de redundancia.
- Cableado multipunto. FOUNDATION fieldbus soportará hasta 32 dispositivos en un solo par de hilos (llamado segmento) – o más si se usan repetidores. En la práctica real, lo más típico es 4 a 16 dispositivos por segmento H1 después de considerar aspectos tales como alimentación, modularidad del proceso y la velocidad de ejecución del lazo.
- Instrumentos multivariables. Ese mismo par de hilos puede manejar múltiples variables provenientes de un dispositivo de campo. Por ejemplo, un transmisor de temperatura podría comunicar las entradas de ocho sensores, reduciendo los costos tanto de cableado como de instrumentos.
- Comunicación de dos vías. Además, el flujo de información ahora puede ser en dos sentidos. Un controlador de válvula puede aceptar una salida de control proveniente de un sistema host u otra fuente y enviar la posición real de la válvula para un control más preciso.
- Por medio de FF, podemos diagnosticar errores de conexiones entre los dispositivos de campo, así como el diagnóstico del tipo de información, si es buena. Mala o incierta.
- Control en campo. FOUNDATION Fieldbus también ofrece la opción de ejecutar algunos o todos los algoritmos de control en los dispositivos de campo en lugar de en un sistema host central. Dependiendo de la aplicación, el control en campo puede proporcionar menores costos y mejor rendimiento, a la vez que permite el control automático para continuar incluso si hay una falla relacionada con un host.

### 5.3. DESCRIPCIÓN DE FOUNDATION FIELDBUS

Fieldbus Foundation está diseñado para resolver aplicaciones de control de procesos. La característica más novedosa e interesante de FF, es que la estrategia de control se define mediante “bloques funcionales” estándar. Estos bloques funcionales tienen una representación directa en el hardware del sistema: muchas de las funciones del sistema, como las entradas y salidas analógicas (AI y AO), o bloques PID (Proporcional/Integrador/Derivador) pueden ser realizadas por el propio dispositivo de campo<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> FERNÁNDEZ, Op. Cit., Disponible en Internet:  
[http://www.peirao.com/data/comun/documentos/jj/foundation\\_hse.pdf](http://www.peirao.com/data/comun/documentos/jj/foundation_hse.pdf)

Con estas características, una estrategia de control se puede distribuir a través de todos los dispositivos de campo, y además de implementar bloques funcionales en sus microprocesadores, también tienen la capacidad de comunicarse de forma directa con cualquier otro dispositivo a través del bus. Existen a la fecha definidos más de 20 bloques de funciones, siendo posible implementar hasta 20 en cada instrumento. Dependiendo de la estrategia de control a implementar, se puede instanciar más de una copia de los bloques requeridos. De ser necesario para la estrategia de control por aplicar, se puede instanciar más de una copia de los bloques requeridos.

La distribución de las estrategias de control en los dispositivos de campo permite reducir las necesidades de equipo de control y de entrada/salida. “Además, aumenta la eficiencia del sistema, en caso de que los sistemas centrales sufran una avería, mientras el bus continúe alimentado el control puede continuar”<sup>12</sup>.

Para aplicaciones con Fieldbus Foundation se definen tres tipos de bloques:

**5.3.1 Bloques de recursos (Resource Block).** Cada dispositivo contiene un bloque de recursos, que describe características e información del dispositivo, como el nombre, fabricante, o número de serie, condición operativa o estado del dispositivo en general.

El acceso a esta información permite detectar problemas potenciales del dispositivo antes de que éstos afecten al proceso. Durante la ejecución del proyecto, el bloque de recursos se usa para identificar un dispositivo, ponerle etiqueta y comisionarlo.

**5.3.2. Bloques de transductor (Transducer Block).** Proporciona las funciones de entrada/salida locales necesarias para leer los sensores y para comandar los actuadores, displays u otro hardware de salida. Es el enlace entre el mundo físico de los sensores y actuadores y el "mundo de datos" del control de procesos. Este brinda información tal como datos de calibración, tipo de sensor, materiales de construcción, y en muchos casos la condición operativa y el estado de los actuadores y sensores.

Se pueden tener varios bloques transductores en un solo dispositivo. Por ejemplo, un bloque transductor puede trabajar sobre el sensor o actuador, otro puede trabajar con el display local, y un tercer bloque puede trabajar con diagnósticos.

---

<sup>12</sup> Ibíd., Disponible en Internet:

[http://www.peirao.com/data/comun/documentos/jj/foundation\\_hse.pdf](http://www.peirao.com/data/comun/documentos/jj/foundation_hse.pdf)

**5.3.3. Bloques funcionales (Function Blocks).** Permiten establecer la estrategia de control. Realizan todas las operaciones del sistema: los cálculos numéricos, todo el procesamiento de control necesario para el sistema, e incluso la acción en si de adquirir un valor o accionar un actuador. Estos bloques permiten correr un lazo de control completamente en los dispositivos de campo, sin involucrar al sistema host.<sup>13</sup>

Después de haber configurado los bloques para realizar un determinado proceso, es necesario configurar el bucle de control, creando enlaces entre los parámetros de entrada y salida de los bloques funcionales. Los enlaces pueden ser locales (si los bloques unidos están en el mismo dispositivo) o remotos (si cada bloque esta en un dispositivo distinto). En caso de que el enlace sea remoto, toda la información comunicada a través de ese enlace viajaría por el bus desde un dispositivo al otro.

En la tabla numero 2 se muestran algunos tipos de bloques funcionales, los cuales se pueden instanciar en los dispositivos de campo y así poder diseñar una estrategia de control deseada.

**Tabla 2. Tipos de bloques funcionales para Fieldbus Foundation**

Categoría	Bloque	Descripción
Input	AI	Analog Input
	DI	Discrete Input
	PUL	Pulse Input
	MAI	Multiple Analog input
	MDI	Multiple Digital Input
Control	PID	PID Control
	SPLT	Splitter
	SPG	Setpoint Genrator
	OSDL	Output Signal Selector and Dynamic limiter
	APID	Advanced PID Control
	EPID	Enhanced PID Control
	STEP	Step Output PID
Calculate	ARTH	Arithmetic
	CHAR	Characterization
	INTG	Integrator
	AALM	Analog Alarm

<sup>13</sup> FBLCLAFFME [en Línea]. Sao Paulo, Brasil: Smar, 2006. [Consultado el 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/FBLCLAFFME.PDF>

Continuación tabla 2.

<b>Categoría</b>	<b>Bloque</b>	<b>Descripción</b>
	ISEL	Input Signal Selector
	TIME	Timer
	LLAG	Lead Lag
	DENS	Density Calculation
	CT	Constant Generator
	FFET	Flip-Flop And Edge Trigger
Transducer and Resource	RS	Resource Block
	DIAG	Diagnostic Block
	HC	Hardware Configuration
	TEMP	Temperature Module Transducer
Output	AO	Analog Output
	DO	Discrete Output
	MAO	Multiple Analog Output
	MDO	Multiple Discrete Output

También se definen otros bloques funcionales, como uno de los más interesantes es el FFB (Flexible Function Block): se trata de un bloque definido por el usuario, con lo que permite a un fabricante o usuario implementar un algoritmo propio que interaccione con bloques funcionales estándar (por ejemplo un sistema de control matricial).

Ya que FF es un protocolo abierto, cualquier fabricante puede ofrecer dispositivos compatibles que funcionarían perfectamente con los dispositivos de otros fabricantes. Para que el cliente final pueda estar seguro de la interoperabilidad de un dispositivo, FF ofrece una serie de programas de certificación, para que los fabricantes puedan comprobar sus productos y garantizar su calidad.

“Todas las funciones realizables en un sistema FF son configuradas y programadas mediante los bloques funcionales, por lo que el diseño de todo el sistema es homogéneo”<sup>14</sup>.

“Para asegurarse de que las herramientas de diseño puedan ser genéricas y para permitir su adaptación a los nuevos dispositivos según vayan saliendo al mercado, cada dispositivo se suministra con su descripción completa en dos tipos de archivos”<sup>15</sup>.

Capability File: El CF describe al sistema de control, con que recursos cuenta el dispositivo, como el número de bloques funcionales y sus tipos, etc.

<sup>14</sup> Ibid., Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/FBLCLAFFME.PDF>

<sup>15</sup> Foundation Fieldbus Technical Overview [En Línea]. Austin: Fieldbus Foundation, 2008. [Consultado el 3 de octubre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.pacontrol.com/download/foundation-fieldbus-overview.pdf>

Device Description File: El DD describe las entradas, salidas y funciones de cada bloque funcional contenido en el dispositivo.

**5.3.4. Estándares Definidos por Fieldbus Foundation.** Se han introducido dos implementaciones relacionadas de FOUNDATION fieldbus para satisfacer diferentes necesidades dentro del ambiente de automatización del proceso. Estas dos implementaciones usan diferentes medios físicos y velocidades de comunicación.

**5.3.5. H1.** El protocolo H1 esta basado en el estándar IEC 61158-2.

- Generalmente se conecta a dispositivos de campo, como sensores, actuadores y I/O. Proporciona comunicación y alimentación sobre cableado estándar en par trenzado.
- Se transfiere la información utilizando codificación Manchester (lo que permite la recuperación de la señal de reloj en recepción sin necesidad de un par de hilos adicional) a una velocidad de 31.25Kbps.
- La tensión mínima aceptable en el bus para que los dispositivos alimentados a través del mismo puedan funcionar correctamente es de 9V. La fuente de alimentación se conecta al bus en paralelo, igual que cualquier otro dispositivo. Por supuesto, para no interferir las señales de datos enviadas, debe contener un filtro que bloquee la frecuencia de 31.25Kbps y sus armónicos.
- No solo admite la clásica topología lineal, si no que mediante cajas de uniones se pueden conseguir otras topologías como árboles, estrellas o combinaciones. Se establece una longitud total para el cable sumando todos los segmentos, y se recomienda conectar los dispositivos al bus mediante segmentos cortos y conectores en T.
- Se admiten varios tipos de cable, dependiendo de la longitud máxima del segmento o de la calidad del cable. Sin repetidores y con el mejor cable contemplado (Par trenzado apantallado, de una sección AWG 18 (0,8mm<sup>2</sup>), la longitud máxima de un segmento H1 puede ser de hasta 1900m, y se admite un máximo de 4 repetidores, con los que se pueden alcanzar 9500m de cable en un único segmento.
- El número de dispositivos conectados al bus se reduce a 32 en zonas normales. En zonas con riesgo de explosión, el número se reduce a sólo unos pocos dispositivos por línea debido a las limitaciones en la fuente de alimentación.
- Puede soportar el ambiente severo y peligroso de las plantas de procesos.
- Proporciona alimentación y comunicación sobre el mismo par de hilos.
- Puede usar el cableado existente en la planta.

- Soporta seguridad intrínseca.<sup>16</sup>

**5.3.6. HSE.** Esta basado en tecnología Ethernet; generalmente conecta subsistemas de entrada/salida, sistemas host, dispositivos de enlace, compuertas y dispositivos de campo que usen cableado Ethernet estándar.

Actualmente no proporciona alimentación sobre el cable. Existen versiones de HSE a 100Mbps y a 1Gbps, y tanto por par trenzado como por fibra óptica. Los componentes necesarios son de uso común y por tanto están disponibles a un muy bajo costo, por lo que para la construcción de la red en si, pueden utilizarse dispositivos comerciales (como hubs o switches de oficina). En una topología típica, la red HSE interconectara los diferentes segmentos H1 de una planta, posiblemente junto con uno o más dispositivos de alta velocidad, e incluso otras redes de campo de terceros.

Para la transmisión sobre el medio se emplea código Manchester, lo que permite la recuperación de la señal de reloj en recepción sin necesidad de un par de hilos adicional. La estrategia de acceso al medio es CSMA/CD, es decir, no se utilizan testigos si no que cada estación decide de forma individual cuando transmitir.

## **5.4. MODELO DE COMUNICACIONES FIELDBUS FOUNDATION**

**5.4.1. H1.** La tecnología de Foundation Fieldbus H1 se puede descomponer en tres partes:

1. La capa física.
2. La pila de comunicaciones.
3. La aplicación de usuario.

Según el modelo OSI, la capa física se correspondería directamente con la capa 1. La pila de comunicaciones de la red H1 no necesita ser muy complicada, ya que no son necesarias tareas de enrutado, establecimiento de conexiones, etc., y por tanto, esta contenida completamente en las capas OSI 2 (capa de enlace de datos) y 7 (capa de aplicación). Las capas descritas por FF son:

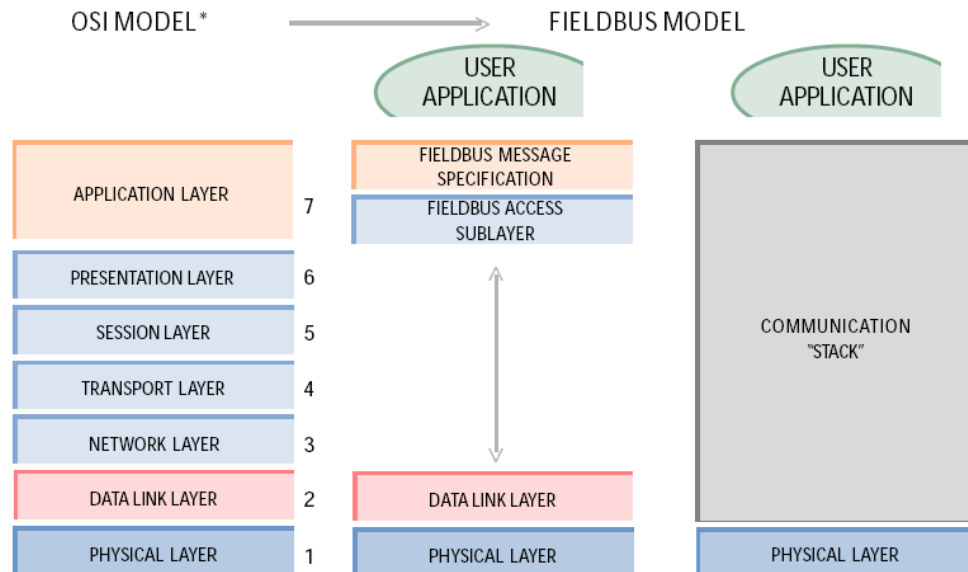
- Fieldbus Message Specification (FMS), correspondiente a la capa 7 de OSI.
- Fieldbus Access Sublayer (FAS), correspondiente también a la capa 7 de OSI, por debajo de FMS.
- Data Link Layer (DLL), correspondiente a la capa 2 de OSI<sup>17</sup>.

---

<sup>16</sup> Wikipedia la enciclopedia libre [en línea]: Fieldbus. Florida: Wikipedia Foundation, 2008. [Consultado el 9 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://en.wikipedia.org/wiki/Fieldbus>



**Figura 5. Modelo de comunicaciones Fieldbus Foundation**



**Fuente:** FERNANDO DE DIOS, José Juan. Foundation Fieldbus y su adaptación a la alta velocidad HSE [en Línea]. Peru: Sistema de Bibliotecas y Biblioteca Central - UNMSM, , 2004 [Consultado 8 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb\\_1998/Pdf/04\\_tut.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb_1998/Pdf/04_tut.pdf)

Además H1 describe una última capa que no esta definida por OSI; se colocaría inmediatamente por encima de la capa 7 y la denominan capa de usuario. En ella se especifica el modelo de aplicación de usuario, describiendo, por ejemplo, la estructura y funcionamiento de los bloques funcionales.

- **Capa física.** La primer capa funcional del modelo de comunicaciones FOUNDATION fieldbus es la capa física, que tiene que ver con la traducción de mensajes en señales físicas sobre el hilo y viceversa. Esta capa esta definida en estándares aprobados por la IEC (International Electrotechnical Commission) y la ISA (Instrumentation, Systems, and Automation Society, aunque se definen como International Society for Measurement and Control). Las señales H1 se codifican usando la técnica Manchester Bifase-L, por lo que se puede considerar serie síncrono pese a no incluir una señal de reloj independiente.

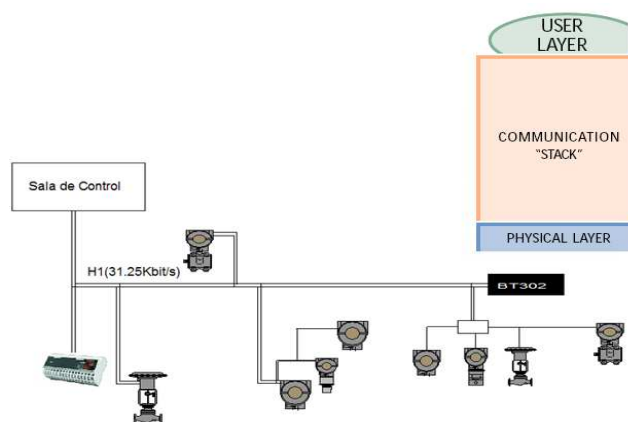
El dispositivo transmisor envía 10mA a 31.25kbps sobre una carga componente continua de alimentación. Las especificaciones del bus admiten tensiones de alimentación entre 9V y 32V, pero para aplicaciones I.S (Seguridad Intrínseca) el

<sup>17</sup> TEJADA, Op. Cit., Disponible en Internet: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb\\_1998/Pdf/04\\_tut.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb_1998/Pdf/04_tut.pdf)

rango de tensiones admitidas dependería del grado de la barrera de seguridad. Si ningún dispositivo lo necesita, también se admite que el bus no transporte la tensión de alimentación. En ese caso, la información sería lo único transmitido por el bus, y todos los dispositivos necesitarían una fuente de energía alternativa<sup>18</sup>.

La topología del bus no está restringida a ser en árbol o completamente lineal, como en otros buses de campo, si no que se admiten topologías híbridas, utilizando cajas de conexiones que permiten la incorporación de derivaciones. Para evitar problemas con las reflexiones lo que se limita es la longitud total del cable.

**Figura 6. Algunas topologías soportadas por el protocolo Fieldbus Foundation**



FERNANDO DE DIOS, José Juan. Foundation Fieldbus y su adaptación a la alta velocidad HSE [en Línea]. Perú: Sistema de Bibliotecas y Biblioteca Central - UNMSM, 2004 [Consultado 8 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet:

[http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb\\_1998/Pdf/04\\_tut.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb_1998/Pdf/04_tut.pdf)

- **Pila de comunicaciones o capa de aplicación.** La capacidad que tienen los dispositivos FF de asumir funciones de control se basa en una comunicación distribuida, que permite:

- Cada dispositivo puede intercambiar datos directamente con otros dispositivos.

- Todos los dispositivos son servidos a tiempo, de forma que los bucles de control tengan un rendimiento estable.

<sup>18</sup> MACKAY, Steve. Foundation Fieldbus High Speed Ethernet (HSE) and TCP/IP. IDC Technologies [En línea]. Australia, Perth : IDC Technologies, 2008. [Consultado el 23 de marzo del 2008]. Disponible en Internet. [http://www.iceweb.com.au/ffeuca/papers/JAPerth/03\\_FF\\_H1\\_and\\_Ethernet\\_TCP\\_IP.pdf](http://www.iceweb.com.au/ffeuca/papers/JAPerth/03_FF_H1_and_Ethernet_TCP_IP.pdf)

- Para que el comportamiento sea determinista, es necesario evitar las colisiones.

Para garantizar estas premisas, H1 utiliza un sistema por paso de testigo con un controlador principal, el LAS (Link Active Schedule o planificador activo). La función de LAS puede ser asumida por un dispositivo de campo normal, o por un dispositivo especializado. Un dispositivo con capacidad para convertirse en un LAS se denomina "Link Master", mientras que los que no tienen esa capacidad se llaman "Basic Devices". De esta manera, en un bus pueden estar presentes varios Link Masters, para que en caso de fallar el LAS activo otro pueda reemplazarlo.

El LAS controla y temporiza las comunicaciones en el bus, utilizando varios testigos y comandos que envía de forma rotativa a todos los dispositivos. También se encarga de autodetectar los dispositivos recién conectados o los que están fallando, configurando así un sistema "plug and play". La función LAS reside en un dispositivo o componente del sistema Host (tal como una tarjeta de interfaz H1, en nuestro caso el DFI302) en el segmento.

Fieldbus Foundation ofrece servicios de comunicaciones con transmisión de datos programada (planificada de antemano de forma periódica) y no programada (asíncrona, transmitida bajo demanda). Las tareas con una fuerte dependencia del tiempo y periódicas, como la comunicación de una variable para un bucle de control, se realizan de forma programada, mientras que las transmisiones de diagnóstico, configuración, etc. se realizan de forma no programada.

El LAS transmite periódicamente un paquete de sincronización (TD: Time Distribution), para que todos los dispositivos tengan exactamente la misma hora. Así en una transmisión programada, el instante en que se inicia y la duración de la misma están preestablecidos de forma precisa.

Estas planificaciones se repiten cíclicamente en lo que se denominan macrociclos. Cada tarea periódica (no sólo las transmisiones, si no también el momento de ejecución de cada bloque funcional) estará programada para un instante concreto dentro del macrociclo, pero teniendo en cuenta que no puede haber mas de una simultáneamente que implique acceso al bus, ya que para asegurarse de que no haya colisiones, un dispositivo sólo puede transmitir cuando el LAS le cede el control del bus mediante un paquete testigo. El LAS se asegura de que el testigo pase por todos los dispositivos de la lista de dispositivos "vivos".

Durante todo el tiempo en que el bus esta desocupado, bien porque los dispositivos están en espera o porque están realizando otras tareas, el LAS permite y arbitra el uso del bus para transmisiones no programadas. Al final de cada transmisión, comprueba si queda tiempo para hacer algo antes de la siguiente transmisión programada, y en caso de que sea así, elige entre ceder

el testigo a alguien para comprobar si tiene información no programada por transmitir, o entre enviar un paquete de sincronización, etc.

A continuación se muestran dos diagramas donde las tareas con dependencias temporales fuertes se realizan manteniendo una agenda estricta de transmisiones. Esta planificación debe ser creada por el operador al configurar el sistema FF.

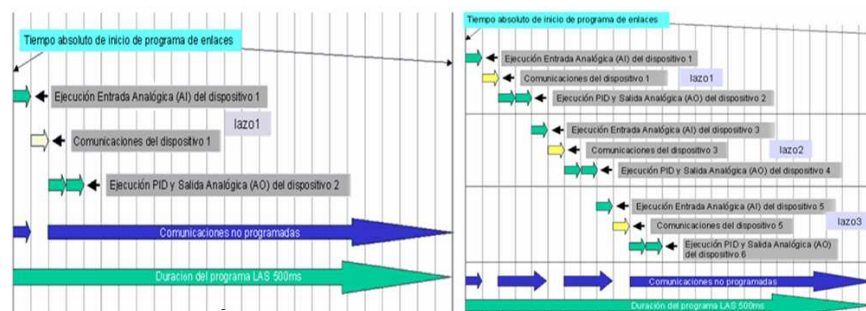
En la figura 7 se muestra el programa para un lazo típico donde la función PID está en el controlador de la válvula ósea en un dispositivo. Cada actividad ocurre a un Offset definido con respecto al tiempo absoluto de inicio. Este ciclo se repite bajo un programa exacto de ejecución. Los mensajes no programados se pueden comunicar en cualquier momento en que no se estén enviando mensajes programados.

También en la figura 7 varios bloques de funciones ejecutándose al mismo tiempo en el mismo segmento, siempre y cuando estén en diferentes dispositivos y tengan tiempos de inicio diferentes. El ejemplo tiene tres lazos, con el PID en el controlador de la válvula.

Sin embargo, no se puede tener más de un dispositivo comunicándose en el bus al mismo tiempo. El programa del ejemplo evita que la comunicación se traslape. Esto se logra distribuyendo los tiempos de inicio de comunicación de los bloques de funciones de manera que un bloque no inicie hasta que el anterior haya terminado.

Por simplicidad, el diagrama muestra bloques ejecutándose en secuencia, sin traslape de procesamiento. En la realidad, múltiples bloques pueden ejecutarse al mismo tiempo siempre y cuando estén en diferentes dispositivos, y los datos se pueden comunicar tan pronto como se complete el procesamiento. Múltiples dispositivos no se pueden comunicar al mismo tiempo.

**Figura 7. Tiempos absolutos de inicio de programa de enlace**



**Fuente:** FERNANDO DE DIOS, José Juan. Foundation Fieldbus y su adaptación a la alta velocidad HSE [en Línea]. Peru: Sistema de Bibliotecas y Biblioteca Central - UNMSM 2004 [Consultado 8 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb\\_1998/Pdf/04\\_tut.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb_1998/Pdf/04_tut.pdf) <http://isaperu.org/articles/fieldbus1.pdf>

- **Capa de usuario.** Foundation Fieldbus define una capa que no es descrita en el modelo OSI: la capa de usuario, que describe las estructuras de datos (como los bloques funcionales, por ejemplo) y el funcionamiento de los sistemas por encima de la capa de aplicación.

La capa de usuario se asienta encima de la pila de comunicaciones, donde le permite a usted interactuar con las otras capas y con otras aplicaciones.

La capa de usuario contiene bloques de recursos, bloques transductores y bloques de funciones que describen y ejecutan las capacidades del dispositivo, tales como control y diagnósticos. Las descripciones de dispositivo (Device Descriptions) permiten al sistema host interactuar y comprender estos bloques sin programación personalizada.

**5.4.2. Especificaciones comunes.** En la capa de Aplicación de OSI, FF coloca dos de sus capas: la capa de especificación de mensajes (FMS) y la subcapa de acceso al bus (FAS).

- **Fieldbus Access Sublayer (FAS).** La FAS proporciona una interfaz entre FMS y la capa de enlace (DLL), ofreciendo servicios de control y manejo de “relaciones virtuales”. Las Virtual Communication Relationships (VCR) describen diferentes tipos de procesos de comunicación, y permiten que las operaciones asociadas sean procesadas más rápidamente. Básicamente, lo que hacen es asignar un código de conexión corto a la dirección completa de una conexión, simplificando el funcionamiento de las capas superiores y reduciendo la cantidad de información a transmitir por el bus, además de controlar el funcionamiento de dicha “relación virtual” y gestionar parte del comportamiento redundante de la red.

La capa de acceso al bus (FAS) soporta tres tipos de VCRs:

**Publisher/Subscriber (Publicador/Suscriptor)** Se utiliza para transmisiones de uno a muchos de los datos que varían con el tiempo, de modo que cada dato transmitido sustituye el anterior. Pueden ser comunicaciones periódicas o no programadas. Generalmente los dispositivos de campo utilizan este tipo para transmitir (publicador) o recibir (suscriptor) los parámetros de entrada/salida de sus bloques funcionales.

**Client/Server (Cliente/Servidor)** Se emplea para transmisiones encoladas, no programadas, de uno a uno. Encolados significa que se envían todos los datos en el orden en que fueron solicitando su emisión (en el tipo Publisher/Subscriber cada dato nuevo dejaba obsoleto al anterior, por lo que este era eliminado). El modo cliente/servidor suele ser utilizado por el operador para tareas de configuración, asentimiento de alarmas, y transmisiones varias a los dispositivos.

**Report Distribution (Notificación de eventos)** Se utiliza para transmisiones encoladas, no programadas, de uno a muchos. Suele utilizarse para transmitir alarmas y notificaciones a las consolas de los operadores<sup>19</sup>.

- **Fieldbus Message Specification (FMS).** Los servicios de la capa de especificación de mensajes (FMS) permiten a las aplicaciones de usuario y a los dispositivos enviar mensajes a través del bus de campo utilizando un conjunto de formatos de mensajes estándar. Los tipos de datos que pueden ser comunicados sobre el bus de campo se asignan a ciertos servicios de comunicaciones. Para una asignación uniforme, se emplean descripciones de objeto (object descriptions). Las descripciones de objeto contienen definiciones de todos los formatos de mensaje estándar, y también incluyen datos específicos de aplicación. Para cada tipo de objeto hay servicios de comunicaciones predefinidos. Las descripciones de objeto se recopilan en un diccionario de objetos (Object Dictionary, OD). Se identifica entonces la descripción de cada objeto por su índice dentro del diccionario:

- ◆ **Network Management (Gestión de red)** Permite configurar la pila de comunicaciones del dispositivo. Da acceso a la base de información de gestión de red (NMIB, Network Management Information Base), y también a la base de información de gestión del sistema (SMIB, System Management Information Base). La NMIB incluye las VCR del dispositivo, variables dinámicas, estadísticas, y la programación del LAS si el dispositivo es un Link Master. Los datos de la SMIB incluyen la etiqueta y la dirección del dispositivo, y las programaciones horarias de ejecución de sus bloques funcionales.

- ◆ **User Application (Aplicación de usuario)** Da acceso a todas las funciones del dispositivo, como sus sensores, actuadores, etc. También permite configurar el funcionamiento del hardware, cargar información de calibración, etc. La sintaxis exacta de los paquetes FMS esta descrita por el estándar ASN.1 de CCITT (ahora ITU-T).<sup>20</sup>

**5.4.3. HSE.** “Las capas física y de enlace empleadas por HSE son las correspondientes a Ethernet. Las capas de red y transporte, son manejadas por UDP, TCP e IP. Las capas de sesión y transporte no se utilizan, y en la capa de aplicación aparecen un gran número de protocolos: SNMP, DHCP, BOOTP, Sntp, así como ciertas especificaciones propias de HSE: FDA, FMS o SM”<sup>21</sup>.

---

<sup>19</sup> Foundation Fieldbus Technical Overview Op. Cit., Disponible en Internet: <http://www.pacontrol.com/download/foundation-fieldbus-overview.pdf>

<sup>20</sup> Wikipedia la enciclopedia libre, Op.Cit., Disponible en Internet <http://en.wikipedia.org/wiki/Fieldbus>

<sup>21</sup> Foundation Fieldbus Technical Overview, Op. Cit., Disponible en Internet: <http://www.pacontrol.com/download/foundation-fieldbus-overview.pdf>

Puede observarse que efectivamente basaron el trabajo en los estándares previos internacionales (tal como se declaró en los objetivos de la fundación), ya que la mayor parte del sistema esta descrito por protocolos bien conocidos. De forma equivalente a H1, por encima de la capa de aplicación se define una capa de usuario, donde se especifica la estructura y funcionamiento de los bloques funcionales, el modo de interconexión, etc.

## 6. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y GENERALES DEL SOFTWARE, DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS

Para lograr realizar la implementación del sistema Fieldbus Foundation en la planta didáctica, se utilizaron tecnologías e instrumentos para comunicación y control que soportaran las exigencias del protocolo Fieldbus. Por esta razón la mayoría de equipos, software e instrumentos fueron adquiridos a través de la multinacional SMAR, la cual ha tenido un gran avance en la fabricación de dispositivos y equipos para buses de campo Fieldbus Foundation.

A continuación presentamos un estudio sobre las características y costos de los instrumentos utilizados en la implementación del sistema Fieldbus Foundation.

### 6.1. SOFTWARE PARA PROGRAMACIÓN DE LOS SISTEMAS FIELDBUS FOUNDATION

**6.1.1. System302.** System302 es un sistema para redes de comunicación industrial, es la tercera generación de sistemas de la multinacional **SMAR** y el primero en aprovechar plenamente la fuerza del protocolo Fieldbus Foundation.

Este sistema se compone de un conjunto de programas diseñados el uno para el otro, estos usan tecnologías abiertas, se integran perfectamente a cualquier hardware, dando al mismo tiempo la libertad de poder conectarse al software o hardware de otros fabricantes, sin el uso de drivers de comunicación propietarios como en el pasado. Este software permite elegir los componentes y construir el sistema por sí mismo, y además esta basado en las más modernas normas internacionales disponibles. Este sistema aprovecha plenamente las informaciones adicionales proporcionadas por el Fieldbus, incluyendo los datos de status, diagnóstico, configuración y calibración, y otras informaciones que no están relacionadas directamente con el control. Con el System302, las informaciones disponibles van más allá de las variables de proceso, pudiendo incluir funciones como la de organización de instrumentos, reduciendo de manera significativa las variaciones del proceso y los costos de mantenimiento. “ Este Sistema de Control Fieldbus permite que las funciones de control sobre la planta, sean llevadas a cabo por los propios dispositivos de campo (Sensores, transmisores, actuadores etc.). Esas funciones de control también pueden ser ejecutadas por controladores multifunciones tradicionales, lo que constituye una solución extremadamente flexible, tanto para sistemas pequeños como para grandes sistemas de control”<sup>22</sup>.

---

<sup>22</sup> FEBLES ÁLVAREZ , Ariel y GARCÍA BLANCO Miguel Ángel. Control de planta piloto con Fieldbus Foundation [en línea]. España: Universidad de Valladolid, 2005. [Consultado el 10 de Noviembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIX/pdf/208.pdf>



Los dispositivos de campo tienen una alta capacidad de procesamiento, basándose en la tecnología del protocolo Foundation, capaz de sustituir al DCS. Es de aclarar que el System302 no es un híbrido de Fieldbus usando la antigua tecnología de los DCS, es un verdadero FCS (sistemas de control de campo). La arquitectura más simple de los FCS elimina varios niveles jerárquicos, inclusive los costosos controladores y subsistemas de entrada/salida, resultando en una arquitectura de sólo dos niveles: industrial y comercial<sup>23</sup>.

Este software también permite que las estrategias de control y las configuraciones de los instrumentos pueden ser editadas o copiadas desde las estaciones de trabajo, permitiendo también realizar operación, supervisión y gestión, donde por medio de una interfaz se puede acceder a toda la información del sistema desde cualquier punto de la planta de proceso, además una única base de datos suministra toda la información, y asegura la consistencia de los datos para todos los sectores de la empresa. La comunicación digital permite además el acceso a variables múltiples. Cada estación de operación configurada está en condiciones de obtener información de cualquiera de los dispositivos de campo, incluyendo su identificación (tag), rango ajustado, materiales de construcción, datos de calibración, etc. Debido a que este software está basado en el protocolo TCP/IP, la conectividad con Internet/Intranet hace posible la operación y configuración de unidades remotas desde un punto central de la planta. En menor escala el sistema permite ser accedido desde cualquier punto de la red local (LAN).

El System302 fue concebido con base en los bloques de función de Fieldbus Foundation, garantizando de este modo la interoperabilidad, independientemente del fabricante y del tipo de equipamiento. La interoperabilidad da a los usuarios la libertad de elegir dispositivos fabricados por sus proveedores preferidos. Como Fieldbus es una norma internacional abierta, los equipos con certificado FF de cualquier fabricante pueden ser interconectados sin problemas. El System302 implementa servicios de DD (Device Description), asegurando la completa funcionalidad de los dispositivos accedidos. En cuanto al diseño de estrategias de control, el System302 permite configurar estrategias de múltiples tamaños, desde un lazo de control a miles de lazos, o más. Una estrategia de control puede ser modificada lazo por lazo a medida que cambian las necesidades de la planta. El software utilizado para este tipo de configuración es el Syscon (Software de configuración Fieldbus).

**6.1.2. Syscon.** Permite la configuración, monitoreo y optimización del sistema de control Fieldbus en forma completa. La configuración del sistema puede hacerse completamente en modo "off-line", sin necesidad de tener comunicación con los dispositivos de campo.

Funciona bajo plataforma Windows NT/2000, comunicándose con los dispositivos de campo a través de los servidores OPC de las interfaces PCI302 o DFI302. Funciones de monitoreo de las estrategias de control y bloques de

---

<sup>23</sup> Ibíd., Disponible en Internet: <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIX/pdf/208.pdf>

función en tiempo real. Generación de documentación automática. A través de los archivos DD y CCF permite la integración de dispositivos Fieldbus de cualquier fabricante. Y para el diseño del sistema de supervisión y gestión se incluye un nuevo componente para la visualización de procesos, el ProcessView.

**6.1.3. ProcessView.** Es un software de supervisión y operación del sistema de control System302. Está compuesto por diversos componentes, cada uno de los cuales desarrolla una función específica:

ProjectWorx: Gestión integral del proyecto.

GraphWorx: Mímicos, pantallas de operación.

AlarmWorx: Manejo y registro de alarmas.

TrendWorx: Tendencias en tiempo real e históricos.

DataWorx: Integración de datos.

Totalmente basado en tecnología OPC. Capacidad de exportación a formato HTML, que permite la visualización de la planta desde cualquier navegador convencional (Internet Explorer o Netscape por ejemplo).

**6.1.4. GraphWorx.** Permite diseñar las interfaces de operación, usando gradientes, sombras y la perspectiva de 3D. Con el GraphWorx se tiene un entorno de trabajo similar al proporcionado por los editores gráficos conocidos, además ofrece un marco de dibujo completo que hace fácil el diseño de la interfaz grafica. El diseño se basa en utilizar dibujos preelaborados como fondo de la pantalla y sobre este fondo se disponen diferentes objetos dinámicos asociados a los bloques en la Base de Datos. Se pueden utilizar tanto ficheros \*.BMP como ficheros \*.ADF, \*.PCX y \*.VBA. Las propiedades de los objetos y pantallas se pueden modificar usando un editor de comandos e inspector de propiedades que permiten: definir las características de una pantalla (Display properties), Propiedades dinámicas de objetos, animaciones, pulsadores y macros al ejecutar una serie de teclas.

**6.1.5. Alarmworkx32.** Aplicación que permite gestionar eventos de un sistema. Disponible en el ProcessView. Ofrece las herramientas necesarias para supervisar en tiempo real la información de alarma en todo un sistema. Además permite clasificación, filtro, visualización, registro, investigación de tag de alarmas, etc.

**6.1.6. Trendworx32.** Es una poderosa herramienta para el análisis de tendencias en tiempo real, registro de datos históricos, reportes, herramientas de análisis que

se integran con los sistemas de información de toda la empresa. TrendWorks ofrece una solución abierta para las aplicaciones que requieren buen rendimiento escalable y distribuido<sup>24</sup>.

## **6.2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS (TRANSMISORES Y ACTUADORES)**

La mayoría de los dispositivos utilizados en la implementación, son transmisores de las serie 302 de la empresa SMAR, los cuales funcionan bajo protocolos Fieldbus Foundation.

Los dispositivos Fieldbus de la Serie 302 fueron desarrollados para ser implementados en pequeños y grandes sistemas. Estos pueden funcionar como maestro en la red, y pueden ser configurados localmente utilizando una llave magnética, eliminando, así, la necesidad de una consola o configurador de aplicaciones.

Estos dispositivos están basados en una tecnología de campo aprobada, que proporciona una operación de alto rendimiento y confiabilidad. La tecnología digital utilizada en la Serie302 posibilita la elección de varios tipos de bloques funcionales. Una interfase entre el campo y la sala de control, reduce considerablemente los costos de mantenimiento, operación e instalación, proporcionando nuevas formas de mejorar el rendimiento, seguridad y disponibilidad de la planta.

A continuación presentamos las referencias y características de los transmisores utilizados en la planta:

### **6.2.1. Instrumentos de temperatura**

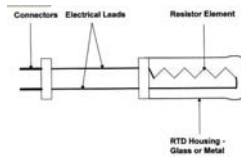
- **Sensor de Temperatura (RTD).** La medición de la temperatura para los lazos de control e indicación, es realizada por medio de detectores de temperatura por resistencia (RTD). Dichos sensores de temperatura son de platino con resistencia de 100 ohm. (Resistencia medida a 0° C) de tres (3) conductores, con juntas no puestas a tierra.

Este sensor (RTD) está protegido contra daños mecánicos y contaminación, por medio de termopozos. El cabezal de la RTD es a prueba de explosión, según sea requerido. Cada sensor de temperatura tipo RTD dispone de cables de 6" de longitud, aislados en Teflón para su conexión.

---

<sup>24</sup> Ibíd., Disponible en Internet: <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIX/pdf/208.pdf>

**Figura 8. Sensor de temperatura (RTD)**



**Fuente:** Wikipedia: la enciclopedia libre [en línea]: Sensor. Florida: Wikipedia Foundation, 2008. [Consultado el 9 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor>

El tipo de RTD usada es una **pt100**, es una termoresistencia de platino y presenta una resistencia de 100ohm o 1000ohm respectivamente a 0°C. La variación de la resistencia con respecto a la temperatura viene dada por:

$$R = R_0(1 + \alpha(T^a - T_0^a))$$

Donde  $T_0^a$  es una temperatura de referencia y  $R_0$  es la resistencia a esa temperatura.

- **Transmisor de temperatura (TT302)**

**Figura 9. Representación física del TT302**



**Fuente:** TT302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2007. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/TT302ME.PDF>

El TT302 es un transmisor utilizado principalmente para la medición de la temperatura, usando RTDs o termopares. Sin embargo, puede aceptar también otros sensores con salida de resistencia o voltaje (mV), como por ejemplo: pirómetros, celdas de carga, indicadores de posición resistivos, etc. Además el TT302 acepta hasta dos sensores y puede funcionar en uno de los siguientes modos:

- Un solo Canal con medición de un solo sensor;

- Doble Canal con medición de doble sensor;
- Un solo canal con medición diferencial de doble sensor;
- Un solo canal, con doble sensor para medición de respaldo.

La Serie TT302 está compuesta por transmisores de temperatura inteligentes, extremadamente versátiles y poderosos. La tecnología digital usada en la serie TT302 permite a un solo dispositivo aceptar varios tipos de sensores, amplios rangos, mediciones individuales o múltiples y una interfase fácil entre el campo y el cuarto de control. También incluye varias características interesantes que reducen considerablemente los costos de instalación, de operación y de mantenimiento. El transmisor acepta dos canales, es decir, dos medidas. Esto reduce el costo por canal. Este transmisor es conveniente para la instalación directa en campo, siendo resistente a la intemperie y a zonas intrínsecas o áreas peligrosas.

Características del transmisor de temperatura:

- Auto-diagnostico.
- Consumo de 12mA.
- 19 diversos tipos de bloques de función para estrategias del control y diagnóstico avanzado.
- Ejecución de hasta 29 links externos.
- Comunicación digital Fieldbus Foundation - H1 31,25 kbps.
- Con capacidad de instanciación de hasta (20) bloques de función simultáneos.
- Puede convertirse en LAS Backup de las comunicaciones.
- Acepta todo tipo de sensores de temperatura (RTDs y Termocupla), señales de mV y de Ohm.
- (2) entradas independientes o doble canal.
- Conexión 2, 3 o 4 hilos y diferencial.
- Display local (opcional) para lectura en unidades de ingeniería de hasta siete variables diferentes.
- Cerramiento anti-explosivo.
- Apto para seguridad intrínseca<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> TT302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2007 [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/TT302ME.PDF>

**Tabla 3. Especificaciones funcionales de TT302**

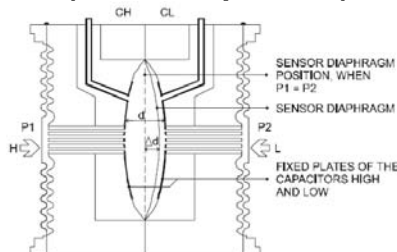
<b>Señal de entrada</b>	Resistencia de la RTD
<b>Señal de salida</b>	Solo digital, FOUNDATION <sup>TM</sup> Fieldbus a 31.25 kbit/s. Optimizado con MVC.
<b>Fuente de poder</b>	Alimentado por bus: 9 - 32 Vdc. Protección contra polaridad inversa. Consumo de corriente nominal: 12 mA. Efecto máximo de la fuente: 0.005% del span calibrado
<b>Indicador</b>	Opcional LCD de 4½ dígitos numéricos y 5 caracteres alfanuméricos. Configurable
<b>Certificación de áreas de riesgo</b>	Aprueba de explosión, de intemperie e intrínsecamente seguro. (est + andares CENELEC y FM). Placa electrónica protegida con Parylene.
<b>Límites de temperatura</b>	Ambiente: -40 a 100 °C (-40a 212 °F). Almacenaje: -40 a 100 °C (-40 a 212 °F). Display: -10 a 85 °C (14 a 185 °F) operación. -40 a 85 °C (-40 a 185 °F) sin daño.
<b>Límites de humedad</b>	10 a 60% RH.
<b>Tiempo de encendido</b>	Aproximadamente 10 segundos.
<b>Tiempo de actualización</b>	Aproximadamente 0.2 segundos.
<b>Configuración</b>	La configuración básica se puede realizar localmente mediante la herramienta magnética, si esta equipado con display. La configuración completa solo es posible usando un configurador remoto.

**Fuente:** TT302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2007. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/TT302ME.PDF>

### 6.2.2. Instrumentos de presión

• **Sensor Capacitivo.** El sensor de presión utilizado por los transmisores inteligentes, es del tipo capacitivo (célula capacitiva), mostrado esquemáticamente en la Figura 10 Célula Capacitiva.

**Figura10. Sensor capacitivo (Célula Capacitiva)**



**Fuente:** LD302ME [En Línea]. Brasil: Smar, 2005. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/LD302ME.PDF>

Donde: P1 y P2 son las presiones aplicadas en las cámaras H y L.

CH = capacitancia medida entre la placa fija del lado de P1 y el diafragma del sensor.

CL = capacitancia medida entre la placa fija del lado de P2 y el diafragma del sensor.

d = distancia entre las placas fijas de CH y CL.

$\Delta D$  = deflexión sufrida por el diafragma del sensor, debido a la aplicación de la presión diferencial  $\Delta P = P1 - P2$ .

Se sabe que la capacitancia de un capacitor de placas planas con la misma área y paralelas puede ser expresada en función del área (A) de las placas y de la distancia (d) que las separa como:

$$C \approx \frac{\epsilon \times A}{d}$$

Donde,

$\epsilon$  = constante dieléctrica del medio existente entre las placas del capacitor.

Se considera CH y CL como capacitancias de placas planas de misma área y paralelas, cuando  $P1 > P2$  o sea:

$$CH \approx \frac{\epsilon \times A}{(d/2) + \Delta d} \text{ and } \frac{\epsilon \times A}{(d/2) - \Delta d} \approx CL$$

Por otro lado, si la presión diferencial ( $\Delta P$ ) aplicada a la célula capacitiva, no desvía el diafragma sensor a más de  $d/4$ , podemos admitir que  $\Delta P$  es proporcional a  $\Delta D$  o sea:

$$\Delta P \propto \Delta d$$

Si desarrolláramos la expresión  $(CL - CH) / (CL + CH)$ , obtendremos:

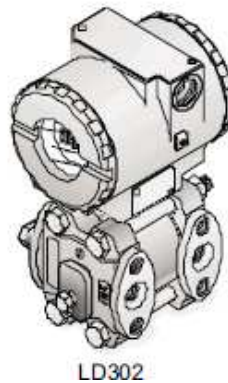
$$\frac{CL - CH}{CL + CH} = \frac{2\Delta d}{d}$$

Como la distancia (d) entre las placas fijas de CH y CL es constante, se percibe que la expresión  $(CL - CH) / (CL + CH)$  es proporcional a  $\Delta D$  y, por lo tanto, a la presión diferencial que se desea medir. Se concluye que, la célula capacitiva

es un sensor de presión constituido por dos capacitores de capacitancias variables, conforme la presión diferencial aplicada.

- **Transmisor de presión (LD302)**

**Figura 11. Representación física del TT302**



**Fuente:** LD302ME [En Línea]. Brasil: Smar, 2005 [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/LD302ME.PDF>

Es un transmisor de presión diferencial, absoluta, manométrica, nivel y medición de flujo. El transmisor posee un sensor capacitivo que proporciona una operación segura y un excelente desempeño en campo. La tecnología digital usada en el LD302 hace posible la selección de diferentes tipos de funciones de transferencia, y una interfaz sencilla entre el campo y el cuarto de control, mayor precisión, estabilidad y muchas interesantes características que reducen los costos de instalación, operación y mantenimiento.

El LD302 es parte de la serie 302 de Smar de equipos Fieldbus, donde sistema posibilita la distribución de las funciones de control entre los equipos de campo (LD302), interconectando varios equipos, de tal forma que se pueden crear estrategias de control apropiadas para su aplicación tan solo enlazando bloques de función.

Aplicaciones del transmisor de Presión:

- **Diferencia de presión:** La presión es aplicada a los lados altos y bajos obteniendo presión diferencial.
- **Flujo:** La presión diferencial es generada por un elemento de flujo primario y la función de raíz cuadrada suministra la medida de flujo.



- **Presión Absoluta:** La presión es medida en el lado alto del transmisor y el lado bajo está en la referencia de cero absoluto debido a una cámara sellada al vacío.
- **Indicador de presión:** La presión es medida en el lado alto del transmisor y el lado bajo es abierto a la atmósfera, proporcionando la referencia verdadera local atmosférica.

Características del transmisor de presión :

- (0 ~0.5 inH2O a 0 ~ 5800 psi).
- Comunicación digital Fieldbus Foundation - H1 31,25 kbps.
- Con capacidad de instanciación de hasta (20) bloques de función simultáneos.
- Puede convertirse en LAS Backup de las comunicaciones.
- Exactitud: 0,075% del rango programado.
- Totalmente digital; sensor, electrónica y comunicación.
- Rangeabilidad: 120:1.
- Display local (opcional), con indicación en unidades de ingeniería de hasta siete variables diferentes.
- Amplia variedad de materiales en contacto con el proceso: SS316, Hastelloy, Monel, Tantalio, Titanio, etc.
- Autodiagnóstico.
- Firmware escalable a través de puerto local.
- Cerramiento anti-explosivo.
- Apto para seguridad intrínseca<sup>26</sup>.

---

<sup>26</sup> LD302 [en Línea]. Brasil: Smar, 2005. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/LD302ME.PDF>

**Tabla 4. Especificaciones funcionales de LD302**

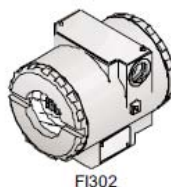
<b>Fluido de proceso</b>	Líquido, gas o vapor.
<b>Señal de salida</b>	Solo digital. FOUNDATION™ 31.25 kbit/s, optimizada con MVC.
<b>Fuente de poder</b>	Alimentado por bus: 9 - 32 Vdc (alimentado por bus). Consumo de corriente típico 12 mA. Protección de polaridad inversa.
<b>Indicador</b>	Opcional LCD de 4½-digit numéricos y 5 caracteres alfanuméricos
<b>Certificación de Áreas de riesgo</b>	A prueba de explosión, de intemperie e intrínsecamente seguro. (Estándares CENELEC y FM). Placa electrónica protegida con Parylene.
<b>Límites de temperatura</b>	<p>Ambiente: -40 a 85 °C (-40 a 185 °F).</p> <p>Proceso: -40 a 100 °C (-40 a 212 °F) (Aceite de Silicon).</p> <p>0 a 85 °C (-32 a 185 °F) (Aceite Fluorolube).</p> <p>-40 a 150 °C (-40 a 302 °F) para LD302L.</p> <p>-25 a 85 °C (-13 a 185 °F) (O-Rings de Viton).</p> <p>Almacenaje: -40 a 100 °C (-40 a 212 °F).</p> <p>Display: -10 a 60 °C ( 14 a 140 °F) operación.</p> <p>-40 a 85 °C (-40 a 185 °F) sin sufrir daño.</p>
<b>Tiempo de encendido</b>	Inicia a operar 5 segundos después de conectado a la fuente de poder.
<b>Desplazamiento Volumétrico</b>	Menos de 0.15 cm <sup>3</sup> (0.01 in <sup>3</sup> ).

**Fuente:** LD302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2005. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/LD302ME.PDF>

### 6.2.3. Instrumentos conversores.

- **Conversor de Fieldbus Foundation a 4 – 20mA (FI302)**

**Figura 12. Representación física del FI302**



**Fuente:** FI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/FI302ME.pdf>

El FI302 es un conversor destinado a funcionar como interfase entre Sistemas Fieldbus con equipamientos que posean entradas de señal de 4-20mA, como por ejemplo un posicionador de válvulas o un actuador eléctrico.

El FI302 produce una salida de 4-20mA proporcional a una entrada recibida por un sistema Foundation Fieldbus. Este dispositivo permite una fácil comunicación entre diferentes tecnologías, además de suministrar varios tipos de funciones de transferencia y varias características destinadas a control de proceso que reducen considerablemente los costes de instalación, operación y mantenimiento.

Características del conversor :

- Configuración a través del protocolo Foundation Fieldbus, como por ejemplo utilizando un computador o llave de ajuste local.
- Capacidad de instanciamiento de bloques funcionales.
- Capacidad para funcionar en zonas explosivas e intrínsecamente seguro.
- Autodiagnóstico.
- Puede convertirse en LAS Backup de las comunicaciones.
- Display digital<sup>27</sup>.

**Tabla 5. Especificaciones funcionales de FI302**

<b>Señal de salida</b>	Tres canales para salida de 4-20mA, alimentación externa tierra común.
<b>Señal de entrada (Comunicación)</b>	Digital, con protocolo Foundation Fieldbus, modo tensión, 31,25Kbit/s con alimentación a través del bus
<b>Fuente de alimentación externa de salidas</b>	3-45 Vdc
<b>Impedancia de salida</b>	Sin seguridad intrínseca: de 7.8KHz a 39KHz debe ser mayor o igual a 3Kohm. Impedancia de salida con seguridad intrínseca: de 7.8KHz a 39KHz debe ser mayor o igual a 400ohm.
<b>Indicador</b>	Indicador LCD de 4,1/2 dígitos.
<b>Certificado en área de clasificación</b>	A La prueba de explosión, a la prueba de tiempo e intrínsecamente seguro (normas CENELEC, NBR, CSA y FM), a la prueba de hebras (CSA y FM), no incendiable (CSA y FM) y para minas de carbón (CENELEC).

<sup>27</sup> FI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/FI302ME.pdf>

Continuación tabla 5

<b>Limites de temperatura</b>	Operación: -40 a 85 °C (-40 a 167 °F) Storage: -40 a 120 °C (-40 a 250 °F) Display: -10 a 60 °C (14 a 140 °F) operación. -40 a 85 °C (-40 a 185 °F) sin d atos.
<b>Limites de Unidad</b>	0 a 100% RH
<b>Tiempo para iniciar operación</b>	Aproximadamente 10 segundos.
<b>Tiempo de actualización</b>	Aproximadamente 0.2 segundos.

**Fuente:** FI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/FI302ME.pdf>

**6.2.4. Puente Universal Fieldbus (DFI302).** Es un dispositivo de enlace que sirve como interfase entre el sistema Fieldbus Foundation y un sistema Host. La DFI302 es una interfase universal con capacidad para manejar todo el sistema de control de la planta, en una plataforma que soporta múltiples protocolos:

- Foundation Fieldbus H1 y HSE.
- Profibus DP/PA.
- Modbus RTU/TCP.
- HART.
- DeviceNet.
- AS-i.

Permite redundancia a nivel de fuentes de alimentación y de buses de comunicación. Una única unidad puede concentrar el procesador principal, las fuentes de alimentación, módulos convencionales de entrada/salida, barreras de seguridad intrínseca y filtros activos para Fieldbus/Profibus. Soporta módulos de entrada/salida convencionales (4-20mA, temperatura, pulsos, relé, transistor, etc.). Servidor OPC para integración a sistemas SCADA y HMI.

Es totalmente modular y presenta la siguiente configuración básica:

DF01 – Rack con 4 slots (Backplane).

DF02 – Terminador para el último rack.

DF03 – Cable para conectar dos racks de longitud 65mm.

DF50 – Fuente de alimentación para el Backplane.

DF51 – Procesador DFI302 con 1xEthernet de 10 Mbps, 1x RS-232, 4x Canales H1;

DF52 – Fuente de Alimentación para el Fieldbus.

DF53 – Fuente de Alimentación de Impedancias de Fieldbus (4 puertos).

Este dispositivo también permite implementar otros tipos de módulos para otras clases de aplicaciones de la Automatización y control de procesos.

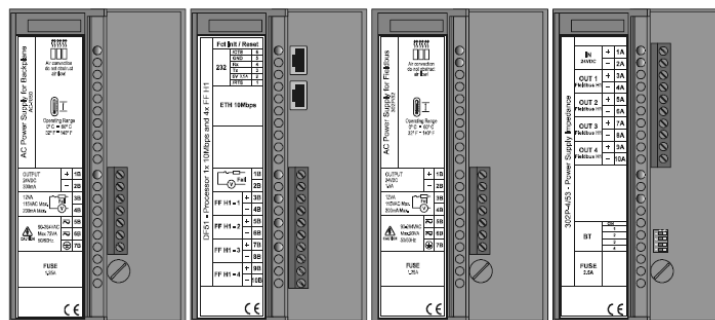
DF11 – 2 Grupos de 8 entradas de 24VDC.

DF21 – 1 Grupo de 16 salidas a colector abierto.

DF44 – 1 Grupo de 8 entradas análogas (4-20mA, 1-5VDC), con resistencias shunt.

DF46 – 4 Canales para salidas 4-20mA

**Figura 13. Representación física del DFI302**



**Fuente:** DFI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/DFI302ME.PDF>

### **Características:**

- Parte integral del System302.
- Interfaz integrada en una sola unidad, junto con Licking device, puente, controlador, Gateway, fuente de poder Fieldbus, y subsistema de E/S.
- Gran integración con dispositivos y software inteligente de múltiples fabricantes debido al uso de tecnologías Standard tales como Foundation Fieldbus y OPC.

- Se conecta a equipos existentes a través de E/S convencionales o comunicación Modbus.
- Redundancia total y aislamiento de fallas para mayor seguridad y operación interrumpida.
- Arquitectura sencilla y de bajo costo.
- Alto flujo de información desde el piso de planta hacia toda la empresa.

**Tabla 6. Especificaciones técnicas y funcionales del DFI302**

<b>Controlador</b>	
Tipo	32-bit RISC
Desempeño Sostenido	50 MIPS
Código de memoria	2MB, 32-bit Flash Memory (firmware escalable).
Datos de memoria	2MB, 32-bit NVRAM (retención de datos y configuración).
Interfaz Fieldbus	Número de puertos 4, independientes con DMA Norma de la capa física ISA-S50.02-1992 Baud Rate 31.25Kbps (H1) Tipo de MAU Passive (no alimentada por bus) Seguridad intrínseca No cumple Aislamiento 500 Vac (cada canal)
Voltaje/Corriente de operación	+5V $\pm$ 5% / 0.95A (típica).
Conector Ethernet	RJ-45.
Conector EIA-232	RJ-12.
<b>Fuente de poder rack</b>	
Entrada	90~260 Vac.
Salida	5V @ 3A, 24V @ 0.3A.
Máximo consumo	35 VA.
<b>Fuente de poder para Fieldbus</b>	
Entrada AC	90 a 260 Vac a 47 a 440 Hz.
Entrada DC	127 a 367 Vdc.
Máximo consumo	45 Watts
Voltaje de salida	24 Vdc $\pm$ 1% para carga 0, para carga máxima entre 90~260 Vac.
Corriente de salida	0 a 1.5 A.
Rizo	20 mvpp
Alarma de salida	1 A, 30 Vdc SPST, cerrada a falla
Aislamiento	entre salida y tierra de la carcasa 500 VRMS entre entrada y salida:: 3000 VRMS
<b>Fuente de impedancia para Fieldbus</b>	
Entrada	24 a 32 Vdc $\pm$ 10%
Corriente de salida	340 mA (máx).
Sobrecorriente de salida	Limitada en 500 mA
Fusible de entrada	2,5 A.

**Fuente:** DFI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/DFI302ME.PDF>

**6.2.5. Terminador de RED BT302.** La función de BT302 es prevenir reflexión de señales y el ruido en la red Fieldbus. Esta compuesto de un resistor de 100ohm en serie con un capacitor de 1 uf. La transmisión de chasis (frame) en Fieldbus se hace por modulación de corriente y la recepción se hace por lectura de voltaje.

La función principal del terminador es convertir la corriente transmitida en un voltaje que se pueda recibir. El capacitor del terminador impide que la entrada de fuerza DC pase por el resistor del terminador pues esto resultaría en el consumo de muchos Watts y la seguridad intrínseca sería imposible.

Un terminador se ubica en las dos extremidades de la red a fin de que la corriente transmitida alcance cada extremidad. Si hubiera solo un terminador en una sola extremidad, la caída de voltaje en el hilado podría resultar en un nivel muy bajo para alcanzar la extremidad.

**Tabla 7. Especificaciones técnicas del BT302**

<b>Máximo Voltaje de Operación</b>	35VDC
<b>Impedancia de Entrada</b>	100 $\Omega \pm 2\%$ @ 7.8 KHz – 39kHz

**Fuente:** BT302ME [En Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/BT302ME.PDF>

## 7. COSTOS DEL SOFTWARE, DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

A continuación se presentan el resumen económico de la propuesta, el cual incluye el precio de los instrumentos y equipos utilizados en la implementación.

**Tabla 8. Resumen económico de la propuesta**

ITEM	DESCRIPCION	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	<b>DF11</b> 2 Groups of 8 24VDC Inputs (Isolated)	1	370,000	370,000
2	<b>DF21</b> 1 Group of 16 Open Collector Driver Outputs	1	450,000	450,000
3	<b>DFI302</b> Foundation Fieldbus Puente Universal Polycarbonate, IP20 protection DIN Rail	1	6,600,000	6,600,000
4	<b>DF1A</b> 4 slot rack (backplane) – Shielded flat cable compatible	1	320,000	320,000
5	<b>DF2</b> Terminator for the last rack	1	60,000	60,000
6	<b>DF3</b> Flat Cable to Connect Two Racks – Length 65mm	1	60,000	60,000
7	<b>DF44</b> 1 group of 8 analogue inputs (4-20mA, 1-5VDC) with shunt resistor	1	980,000	980,000
8	<b>DF46</b> 4 Channels 4-20Ma, 0-5V, 1-5V, 0-10V, $\pm 10V$	1	1,520,000	1,520,000
<b>TOTAL DE LA PROPUESTA SIN IVA</b>				6,360,000



## 8. MONTAJE E INSTALACIÓN DEL SISTEMA BUS DE CAMPO FIELDBUS FOUNDATION

### 8.1. INSTALACIÓN DE LA RED HSE

El cable utilizado para la red HSE es un cable UTP RJ-45, el cual permite realizar la comunicación entre dispositivos de enlace de datos y el Hub (estación de Ingeniería) o un switch.

**Figura 14. Cable UTP para la red HSE**



**Fuente:** Wikipedia: la enciclopedia libre [en línea]: Cable de categoría. Florida: Wikipedia Foundation, 2008. [Consultado el 28 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Cable\\_de\\_Categor%C3%ADas\\_6](http://es.wikipedia.org/wiki/Cable_de_Categor%C3%ADas_6)

En este proyecto la red HSE implementada nos permite interconectar las estaciones de ingeniería, clientes OPC y un servidor WEB con los dispositivos de campo, con el fin de realizar configuración, gestión, control y supervisión de manera remota utilizando como intermediario el dispositivo de enlace de datos (DFI302).

Esta arquitectura del sistema también permite que el DFI pueda enviar datos y ser configurado desde una red corporativa, de igual forma si se cuenta con un servidor Web en la red, el sistema Foundation Fieldbus a través del DFI permite enviar, recibir datos y ser configurado desde la Internet. En la figura 15 se observa un bosquejo de la red HSE implementada para la configuración, gestión y supervisión de los dispositivos de campo que realizan y corren estrategias de control en la planta didáctica.

### 8.2. INSTALACIÓN DE LA RED H1

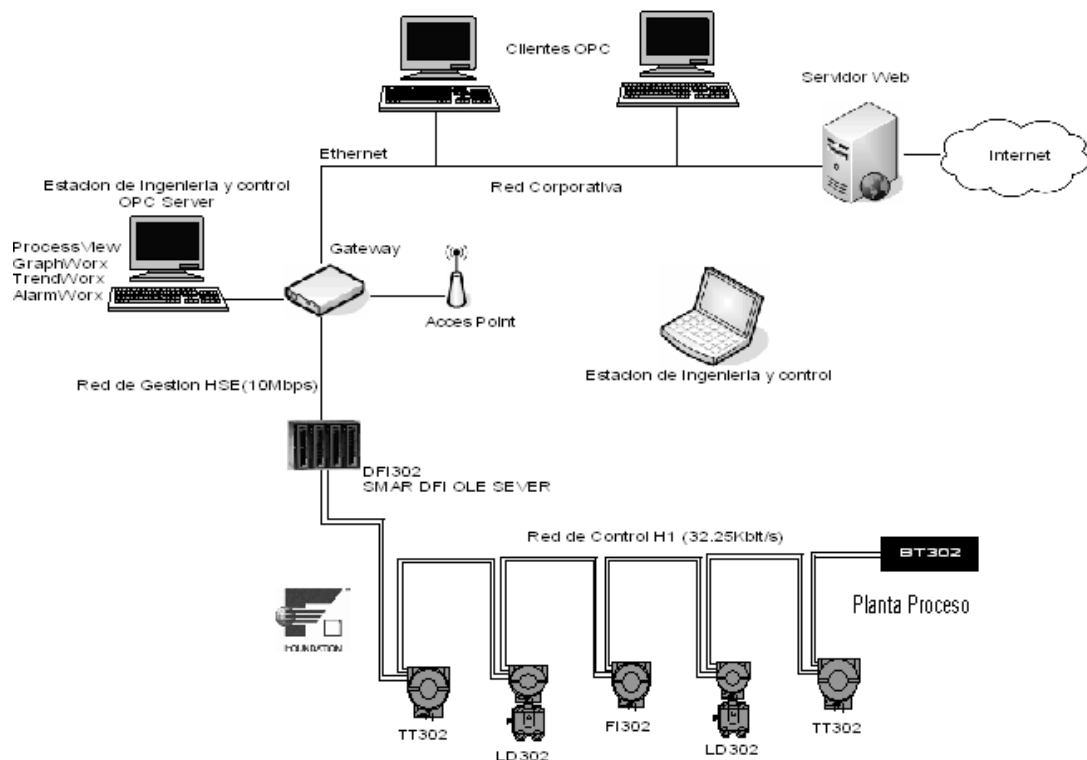
Para la instalación de la red H1 se utilizó cable par trenzado tipo A (AWG = 18, Resistencia = 22ohm/km, Atenuación = 2dB/km), ya que es recomendado para el mejor desempeño posible y además con este cable el ruido es cancelado debido a la dirección opuesta de corriente en cada cable. Esta red permite alimentar y energizar los transmisores, así como también realizar la

comunicación entre ellos, para la transferencia e intercambio de información y datos de configuración y control que pueden venir desde otro transmisor o desde la estación de ingeniería y estación de control utilizando como intermediario el dispositivo de enlace de datos DFI302. En la figura 15 podemos observar el bosquejo de la red H1 implementada en la planta didáctica.

### 8.3. TOPOLOGÍA UTILIZADA PARA LA CONEXIÓN DE LOS TRANSMISORES

Para la conexión de los dispositivos de campo se utiliza la topología Punto a Punto, en donde todos los dispositivos son conectados en cadena a lo largo del bus (Red H1) de campo o segmento. En este proyecto solo se utilizó un segmento o canal del DFI302 para la conexión de todos los transmisores a través del bus ya que solo se dispone de 5 de ellos y no se excedía de la máxima cantidad de dispositivos por bus. La figura 15 muestra el esquema implementado con dispositivos de la multinacional SMAR<sup>28</sup>.

**Figura 15. Topología de bus utilizada en el proyecto y red de comunicación**



<sup>28</sup> Fieldbus Foundation [en línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado el 28 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: [www.SMAR.com](http://www.SMAR.com)

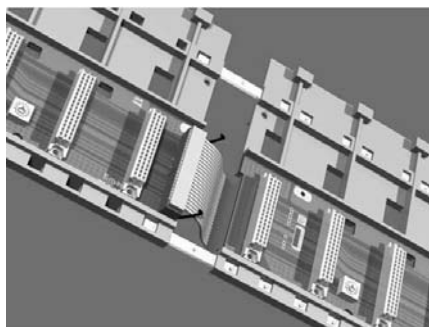
## 8.4. CONEXIÓN E INSTALACIÓN DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS FIELDBUS

Para la instalación de la red Fieldbus en la planta, se utilizaron 5 transmisores, un conversor de Fieldbus a corriente, un terminador de red y 1 dispositivo de enlace de datos DFI302 con módulos de entradas - salidas análogos y digitales. A continuación se presenta gráficamente la instalación de cada uno de los transmisores y dispositivos Fieldbus utilizados en la planta, tanto la conexión a la red H1, como la conexión de los sensores u actuadores, y la conexión y montaje del DFI302.

Cada transmisores contiene internamente una tarjeta electrónica la cual se encarga de acondicionar la señal tomada del sensor, procesarla de acuerdo a la estrategia de control que haya implementada en ella y posteriormente enviarla a través de la red H1 en caso de que otros transmisores la necesiten. Para esto cada transmisor posee dos orificios laterales para dar acceso a los cables de conexión del bus y de los sensores o actuadores.

**8.4.1. Dispositivo de enlace de datos (DFI302).** En la instalación del dispositivo de enlace de datos, los módulos principales (DF50, DF51, DF52, DF53) están conectados o montados en un solo Rack (DF1) principal, mientras que los módulos de entradas – salidas análogas y digitales (DF11, DF21, DF44, DF46) se instalaron en un segundo Rack. Cada Rack dispone de cuatro ranuras para instalar los módulos y una ranura que se utiliza como conector de bus a través de un cable plano (DF3) el cual es usado para conectar el IMB (InterModule Bus) de un rack a otro, agregando modularidad y flexibilidad en la instalación, además permite comunicación con diferentes Racks que contengan otros tipos de módulos los cuales se instalan en caso de ser necesario dependiendo de la aplicación.

**Figura 16. Representación física de Racks DF1**

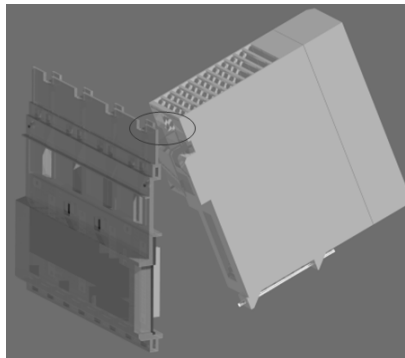


**Fuente:** DFI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008 [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/DFI302ME.PDF>

Para realizar la instalación del DFI302 se siguen los siguientes pasos:

- 1. Se conectan los cuatro módulos (DF50, DF51, DF52, DF53) más el terminador (DF2) en el Rack (DF1) (Ver Figura 17).
- 2. Se conecta la tensión de alimentación en la entrada de DF50 y DF52.
- 3. Se conecta la salida de DF52 a la entrada de DF53.
- 4. Se conecta el cable RJ-45 Ethernet (cable par trenzado), para comunicar el DF51 al HUB o Switch.
- 5. Se conecta el bus Fieldbus H1 a los pines FF H1 del DF51 y del DF53.
- 6. En cuanto a la conexión al HUB o Switch, si se dispone de un servidor DHCP, el DFI302 obtendrá automáticamente una dirección IP, pero si este servidor no está disponible, el dispositivo inicialmente tendrá un IP fija (esta dirección IP fija inicial podrá ser cambiada a través del FBTools o software de comunicación del System302).

**Figura 17. Conexión de los módulos en el Rack**



**Fuente:** DFI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/DFI302ME.PDF>

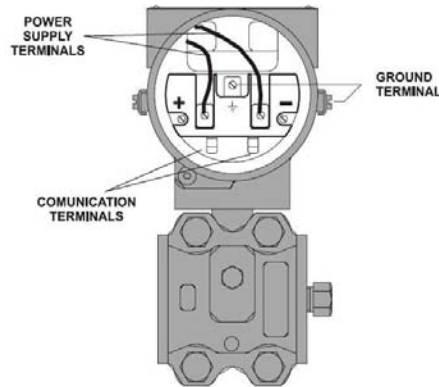
En la figura 18 se representa la conexión eléctrica y configuración manual del DFI302. En el Detalle A son presentadas las conexiones eléctricas citadas arriba, sin embargo sin la visión del rack (DF1) y del terminador (DF2). En el Detalle B, se tienen las micro-llaves (dip-switches) que habilitan el terminador interno para cada canal Fieldbus H1. En este proyecto, solamente utilizamos un solo canal Fieldbus H1, la llave correspondiente al canal 1 está en la posición habilitada (ON).

**Fuente:** DFI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/DFI302ME.PDF>



#### 8.4.2. Transmisor de presión (LD302)

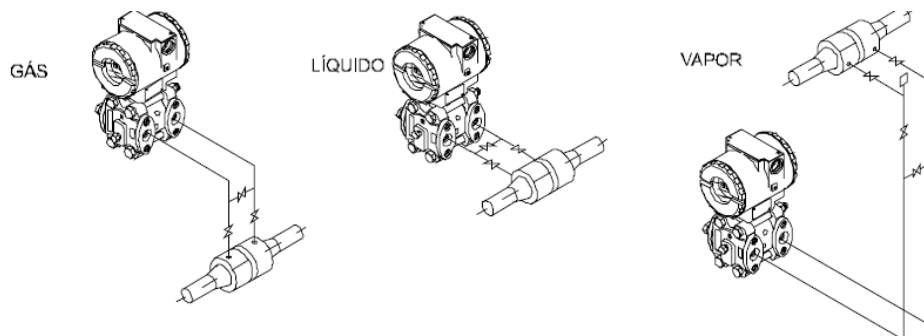
Figura 19. Conexión eléctrica del transmisor LD302



**Fuente:** LD302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2005. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/LD302ME.PDF>

La instalación del transmisor debe ser la adecuada de acuerdo al tipo de líquido o fluido que pase por el sensor, en nuestro caso (H<sub>2</sub>O):

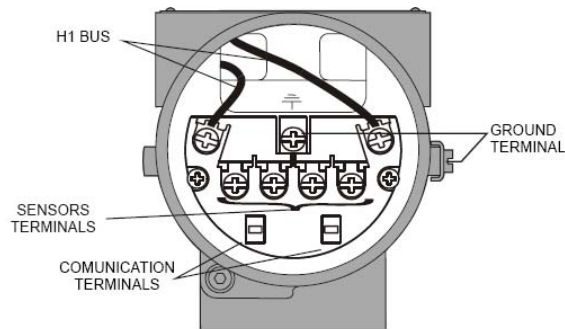
Figura 20. Montaje del transmisor



**Fuente:** LD302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2005 [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/LD302ME.PDF>

### 8.4.3. Transmisor de temperatura (TT302)

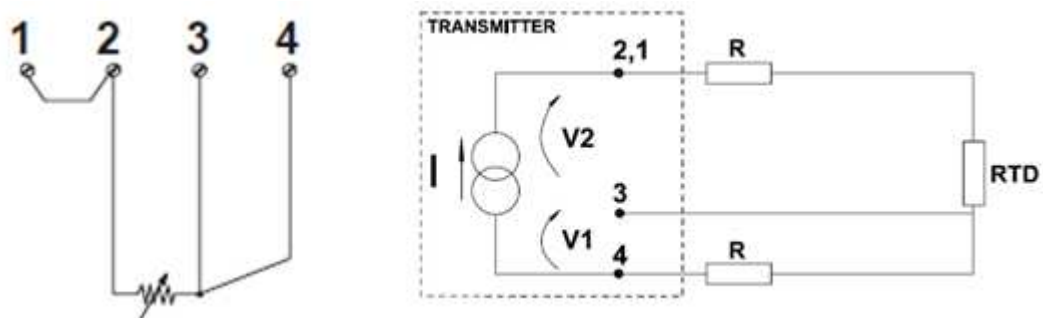
**Figura 21. Conexión eléctrica del transmisor TT302**



**Fuente:** TT302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2007. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/TT302ME.PDF>

Conexión del sensor RTD PT100: como ya explico anteriormente, el TT302 acepta varios tipos de sensores, Termopares y termoresistencias. En este caso utilizamos una termoresistencia RTD (PT100). Para una medición correcta de temperatura con la RTD, es necesario eliminar el efecto de la resistencia de los hilos de conexión del sensor con el circuito de medición. Para evitar este efecto se realiza una conexión a 3-hilos como se puede ver en la figura.

**Figura 22. Conexión eléctrica del sensor RTD en el transmisor TT302**

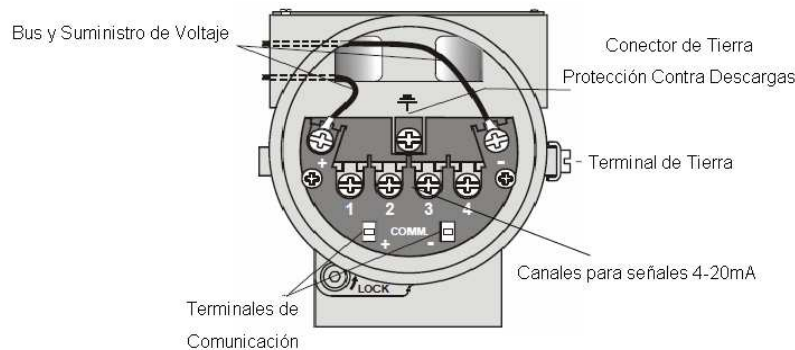


**Fuente:** TT302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2007. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/TT302ME.PDF>

De esta forma, haciendo  $V_2 - V_1$ , se anula el efecto de la caída de tensión en la resistencia de línea entre las terminales 2 y 3.

#### 8.4.4 Conversor de Fieldbus Foundation a 4 – 20mA (FI302)

**Figura 23. Conexión eléctrica del conversor FI302**



**Fuente:** FI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/FI302ME.pdf>

La figura 23 muestra todos los terminales de conexión, entre ellos están:

- 2 terminales, (+) (-) para la conexión del bus de la red la H1.
- Conectores y terminales de tierra.
- 2 terminales de comunicación (+) (-).
- 4 terminales o canales de salida, corriente 4-20mA.

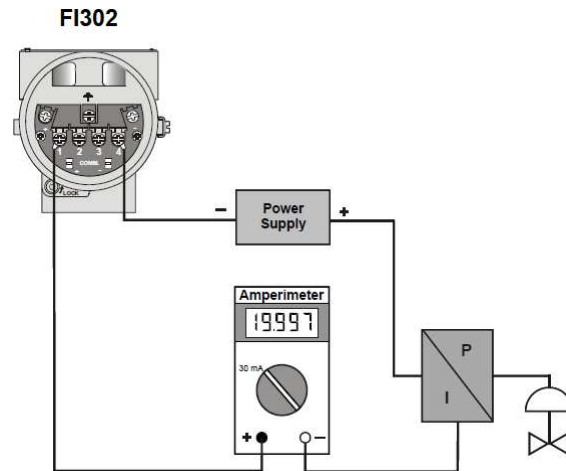
Estos últimos son los terminales o canales para salidas de corriente de 4-20mA, en especial los que están marcados con los números 1, 2 y 3. El terminal 4 es el común de la fuente de alimentación externa.

La señal de salida del conversor es en verdad un enlace de corriente, por lo tanto es necesario utilizar una fuente de alimentación externa de (24Vdc). El FI302 controla la corriente del lazo (ver la Figura 24). Los tres canales poseen una tierra común para la fuente de alimentación externa. La salida es limitada por la tensión de la fuente de alimentación externa.

En caso de que se pierda la alimentación en el bus, la salida del dispositivo será incierta. Pero si la alimentación se mantiene, y se pierde la comunicación, la salida puede ser pre-configurada para que el conversor fije o ponga en sus salidas un valor de seguridad.



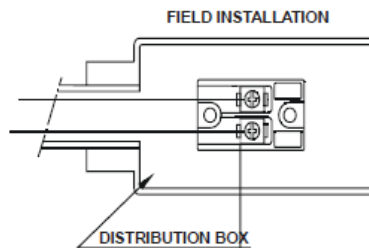
**Figura 24. Conexión de los canales del FI302**



**Fuente:** FI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/FI302ME.pdf>

#### **8.4.5. Dispositivo terminador de Red BT302**

**Figura 25 .Conexión del terminador de red BT302**



**Fuente:** BT302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/BT302ME.PDF>

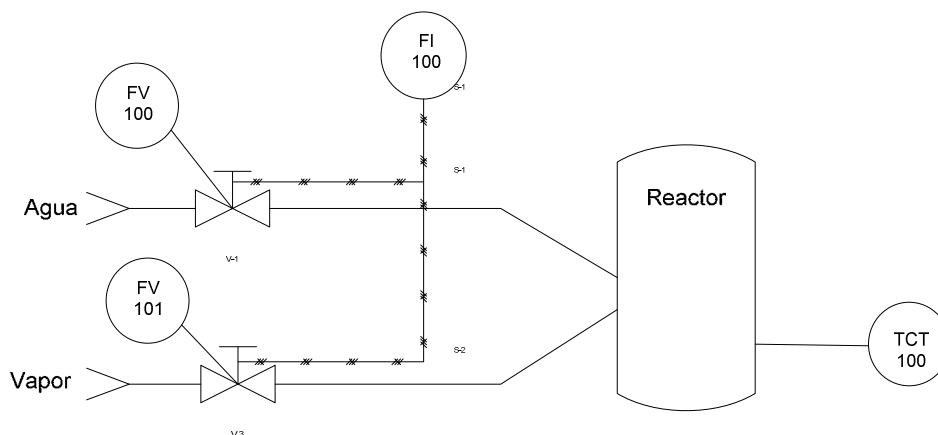
Este dispositivo se conecta a la red, y es instalado en las extremidades de la red H1.

### **8.5. INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE SYSTEM302**

Se mostrara como se configura el software Syscon del System 302 para implementar una estrategia de control, indicando de manera detallada como se deben instanciar los bloques funcionales de cada transmisor y como se deben de parametrizar para su correcto funcionamiento. Además se mostrara los enlaces entre los bloques funcionales que van a armar la estrategia de control deseada.

**8.5.1. Ejemplo de Configuración e Implementación de una estrategia de control en System302.** A continuación se presenta el diagrama P&ID, del sistema al cual se le configurara e implementara la estrategia de control en el System302.

**Figura 26. Esquema P&ID del ejemplo de la estrategia.**



En este trabajo se utiliza el software SYSCON versión 7.1 de SMAR, el cual usa la terminología de Fieldbus Foundation en lo referente a la configuración de los diferentes dispositivos que se utilizan para el control de la planta.

“Para poder utilizar el SYSCON es importante instalar el paquete Device Description (los DDs), que garantizan la interoperabilidad, al igual que el FBTools con el cual descargamos en la memoria FLASH de cada dispositivo, incluido la DFI302, su programa ejecutable”<sup>29</sup>.

La configuración de un sistema en SYSCON tiene dos etapas: una fuera de línea (off-line) y otra en línea (on-line). La etapa fuera de línea puede realizarse sin necesidad de tener la red Fieldbus lista, lo cual agiliza el desarrollo de la aplicación. Mientras que la configuración en línea exige tener instalada toda la red con sus respectivos dispositivos. Toda la configuración, operación y diagnóstico del sistema puede hacerse remotamente usando un configurador o consola de operador. La configuración consiste básicamente, en asignar “tags” a los dispositivos y bloques funcionales, construir una estrategia de control con los bloques definidos, enlazándolos entre sí y caracterizar o ajustar sus parámetros contenidos, de tal forma que se obtenga la operación correspondiente.

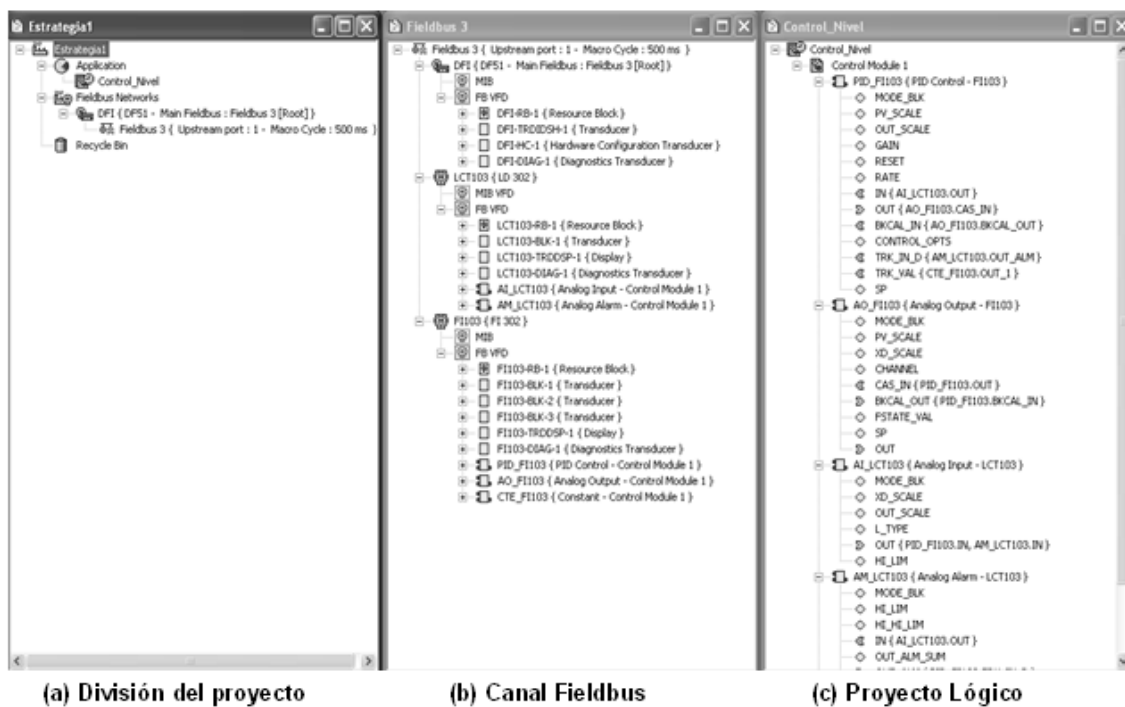
La configuración del sistema se divide en configuración física y configuración lógica.

<sup>29</sup> FEBLES ÁLVAREZ y GARCÍA BLANCO, Op. Cit., Disponible en Internet: <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIX/pdf/208.pdf>

• **Configuración física del proyecto.** En este trabajo se desarrolla primero el proyecto físico, en el cual se define un Fieldbus equivalente al segmento instalado. A partir de este se comienza a definir cada uno de los dispositivos existentes, incluido el DFI302.

El DFI302 se define con la opción New Bridge para establecer cual de los 4 canales de que dispone tendrá la comunicación con el segmento definido, mientras que todos los dispositivos se definen como New Device. Se seleccionan las características que definen el tipo de dispositivo según el fabricante. Sólo se soporta como fabricante a SMAR. Además, es importante definir los “tags”, para poder identificar los dispositivos y bloques funcionales con facilidad. Puede definirse cualquier dispositivo de campo como master backup de modo que si falla la conexión del DFI las funciones de control no se vean afectadas. Al terminar de definir todos los dispositivos asociados al Fieldbus, la ventana del proyecto físico quedaría como se muestra en la figura 27. Dentro de cada dispositivo se pueden ver los dos VFDs disponibles. Como ya se ha indicado, el MIB VFD soporta la gestión del sistema y la red, mientras el FB VFD soporta la aplicación de los Bloques Funcionales. Una vez que estén definidos los dispositivos del bus se pueden agregar los bloques correspondientes a cada uno, según la estrategia de control que previamente se ha planteado desarrollar en la planta. Independientemente de la estrategia, cada dispositivo tiene que tener definido un bloque de recurso (RS) que caracterice su hardware y este debe ser el primero en definirse. Además, se define un bloque transductor (TRD) por sensor conectado a los dispositivos y para el DFI.

**Figura 27. Proyecto realizado en SYSCON 7.1**



- **Configuración lógica del proyecto.** Para esta configuración el SYSCON hace uso en un link llamado Área. Para el SYSCON, un Área puede tener varios Process Cells. Por ejemplo, “si la planta en cuestión tuviese varios buses, se definen tantas Process Cell como buses existan dentro o no de la misma Área”<sup>30</sup>. En este trabajo como la planta consta de un solo bus, será usado un solo Process Cell. Cada Process Cell puede contener varios Control Module. Estos soportan la aplicación de control, es decir enlazan los bloques funcionales en una secuencia lógica de acuerdo a la estrategia de control planteada. Los bloques definidos para esta parte deben coincidir con los definidos en el proyecto físico y con los que posteriormente serán enlazados para crear la Strategy. Se recomienda que los bloques RES y TRD no sean definidos en esta etapa, por ser innecesarios en esta parte del proyecto.

Una visión general del proyecto físico y lógico se muestra en la figura 27, en donde:

- (a) representa la división del proyecto.  
Application – planta lógica, en esta parte se inserta la estrategia de control.  
Fieldbus Network – Planta Física, en esta parte se añaden los dispositivos y bloques funcionales del proyecto,
- (b) indica los transmisores asociados a la red Fieldbus H1 (se utiliza el canal 1). Y los bloques funcionales asociados a cada transmisor, Y
- (c) representa los bloques funcionales que se enlazan entre si para formar la estrategia de control.

Después de haber adicionado los bloques funcionales a cada transmisor, ahora se pasa a la parametrización de estos, como se puede ver en la siguiente tabla:

**Tabla 9. Parametrización de los bloques funcionales**

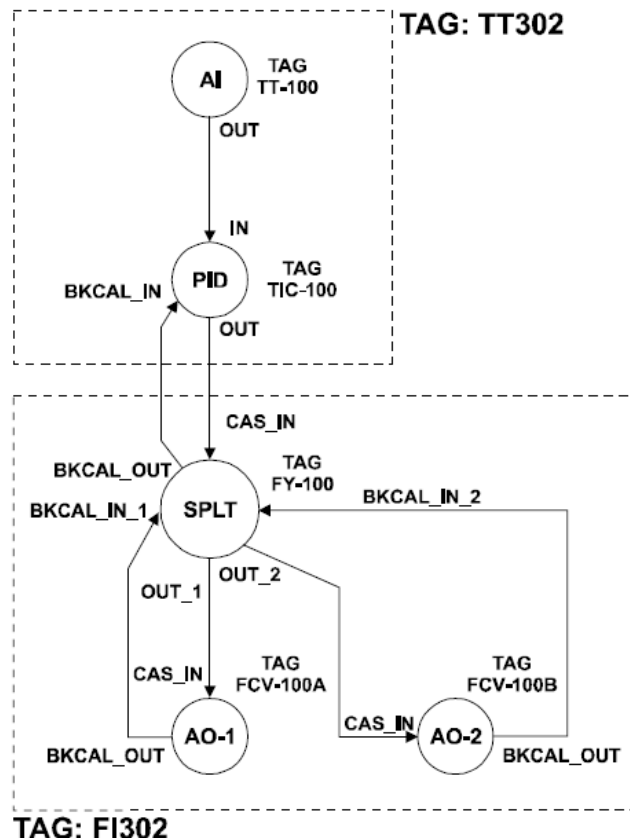
Device	Block	Block Tag	Parameter	Element	Value
TT302	AI	TT-100	MODE_BLK	Target	AUTO
	PID	TIC-100	MODE_BLK	Target	AUTO
			PV_SCALE		0-600 °C
			OUT_SCALE		0-100 %
	SPLT	FY-100	MODE_BLK	Target	Cas
			LOCKVAL		Yes
			IN_ARRAY		0, 48, 50, 100
			OUT_ARRAY		100, 0, 0, 100
FI302	AO	FCV-100A	MODE_BLK	Target	Cas
			PV_SCALE		0-100 %
			XD_SCALE		4-20 mA
	AO 2	FCV-100B	MODE_BLK	Target	Cas
			PV_SCALE		0-100 %
			XD_SCALE		4-20 mA

**Fuente:** DFI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/DFI302ME.PDF>

<sup>30</sup> Ibid., Disponible en Internet: <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIX/pdf/208.pdf>

- **Desarrollo de la estrategia de control.** Para completar la configuración lógica del proyecto, cuando todos los bloques implicados estén insertados y parametrizados, se está listo para construir la Strategy enlazando dichos bloques. Por Ejemplo en la figura 28 podemos observar algunos bloques enlazados:

**Figura 28. Enlace de bloques funcionales para la estrategia de control en SYSCON.**



**Fuente:** DFI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/DFI302ME.PDF>

- **Comisionamiento y descarga de la estrategia.** Después de la configuración de los parámetros y construcción de la estrategia, se debe puede iniciar la comunicación con los equipamientos, ósea en ponerse en modo Online.

Es necesario hacer el comisionamiento de los equipamientos para que los tags, IDs y direcciones de cada instrumento sean atribuidos adecuadamente, si este procedimiento no se ha realizado, el Syscon detectará que el instrumento no ha sido comisionado y el Download de la configuración de la estrategia en los transmisores será abortado. Finalizado el comisionamiento de los equipamientos o transmisores, se puede iniciar el proceso de Download. El proceso de Download puede ser hecho, por ejemplo, retornando a la ventana

de la figura 27(a), y haciendo clic sobre el ícono Fieldbus Networks, y con el botón derecho del Mouse, seleccionar la opción Download.

- **Sistema supervisor.** Después de estar configurada la aplicación en el SYSCON, con lo cual se logra implementar la estrategia de control en la planta, se plantea la necesidad de desarrollar un sistema de supervisión, que permita una comunicación cómoda e intuitiva entre el usuario y dicha planta. Como se conoce, usando este tipo de sistemas, la tradicional sala de control puede sustituirse por uno o varios ordenadores con una interfaz gráfica. Esta interfaz debe incluir las funciones que se ejecutan en la planta.

Para lograr este objetivo, se dispone del software ProcessView de SMAR. Este es un software que permite la visualización del proceso, la Adquisición de datos, reportes de Alarma, análisis de gráficos, tendencias de históricos, etc.

- **Arquitectura del sistema:** Con una aplicación en ProcessView se provee una visión del proceso, haciendo disponibles en tiempo real los datos de interés al usuario, en un formato adecuado para su comprensión.

Las funciones internas de acceso a la Base de Datos leen datos almacenados en nodos locales o remotos y los transfieren a las aplicaciones de software correspondientes. Por ejemplo, GraphWorx, TrendWorx y AlarmWorx del ProcessView. Esta transferencia ocurre de forma transparente al operador, según el esquema de la figura 15 y la figura 29 que muestra la arquitectura del sistema de supervisión.

El dato puede ser escrito en el hardware del proceso a través de los drivers de E/S del DFI. Por lo tanto, se puede decir que el driver de E/S se encarga de las funciones de adquisición de datos y gestión.

En este proyecto el DFI OLE Server (Smar.DFIOLEServer.0) es un software para lado del servidor utilizado para conectar el software del lado cliente con el DFI302 instalado en la red.

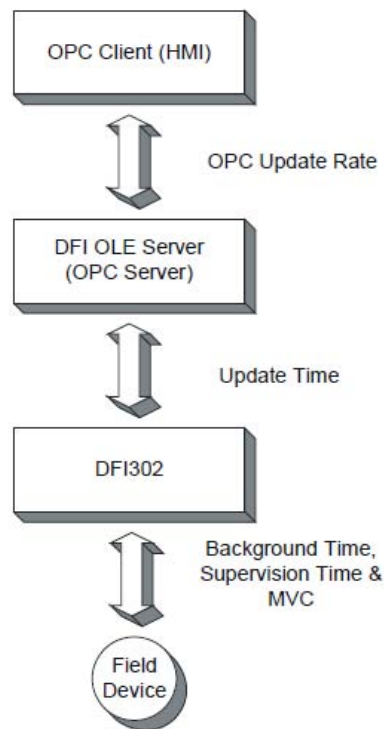
De esta manera en el cliente OPC se genera una base de datos con todos los tags de los bloques funcionales utilizados en la estrategia de control y así a través del OPC Tag Browser se pueden configurar los ítems correspondientes a los parámetros que quieren ser accedidos en el campo.

La arquitectura del sistema también permite que el DFI pueda enviar datos y ser configurado desde una red corporativa, de igual forma si se cuenta con un servidor Web en la red, el sistema Foundation Fieldbus a través del DFI también permite enviar, recibir datos y ser configurado desde la Internet.

En la figura 27 muestra que los datos de los dispositivos de campo son recolectados por el DFI302, durante un tiempo de Background (tiempo para tráfico de datos) incluido en el Fieldbus Macrocycle el cual es configurado en el Syscon. Al utilizar el MVC (Multiple Variable Container), esos datos son

optimizados. El tiempo de supervisión (Supervision Time) controla la tasa en que el MVC es leído del dispositivo de campo. En cada tiempo de actualización (Update Time), el DF51 envía los datos para el DFI OLEServer, en el cual se actualiza el banco de datos. Todos los grupos OPC serán actualizados de acuerdo con la tasa de actualización OPC (OPC Update Rate).

**Figura 29. Arquitectura del sistema de supervisión**



**Fuente:** DFI302ME [en Línea]. Brasil: Sma, 2008. [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/DFI302ME.PDF>

En cuanto a la tasa de actualización del HMI, la tasa de actualización es un pedido del cliente y el servidor responderá con una tasa de actualización más próxima posible de la exigida. Cada cliente posee modos específicos para configurar esta tasa.

- Configuración del sistema de supervisión: Para crear la aplicación del ProccesView y que esta se inicie correctamente se necesitan tres cosas:

- 1) Asignar las respectivas direcciones a los dispositivos de campo.
- 2) Asignar los tags respectivos, incluyendo los de los bloques funcionales, a cada dispositivo del campo.
- 3) Generar y exportar la OPC database.

Después de haber realizado los tres pasos anteriores, se debe de asignar a cada dispositivo de la interfaz del ProcessView un tag respectivo, los cuales están ubicados en el OPC database en la aplicación OPC Tag Browser.

- OPC server, cliente y base de datos: En este proyecto en la mayoría de las estrategias de control implementadas se configuro el servidor OPC y el cliente sobre una misma maquina, pero en caso de querer utilizar un solo servidor OPC y diferentes clientes OPC en una misma red, se debe utilizar la aplicación Dr DCOM. A través de esta utilidad se puede configurar el DCOM para que los servidores OPC y clientes puedan fácilmente y sin problemas funcionar correctamente.

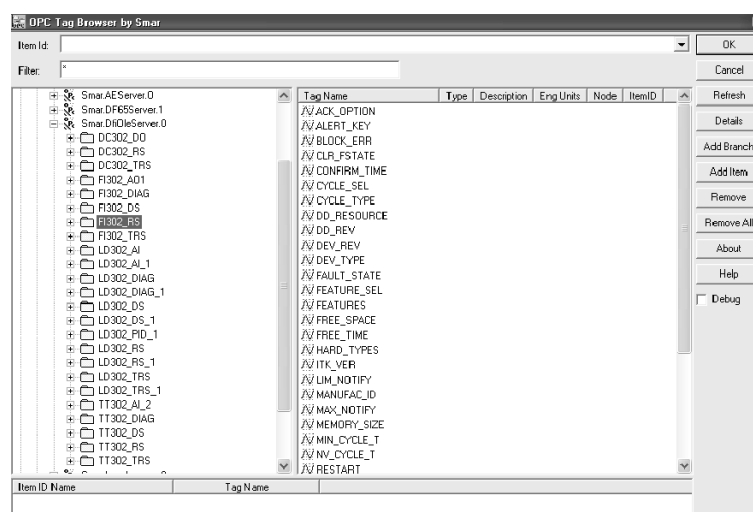
El Dr DCOM de SMAR es una utilidad diagnóstica que tiene dos funciones básicas:

- Obtener información local y remota sobre los clientes y servidores OPC instalado en ellos y analizar esa información. Dr DCOM puede comprobar si el OPC trabajará correctamente en una determinada red y la configuración de DCOM.
- Ayuda a los usuarios a crear DCOM y OPC servidor para que vayan a trabajar en una red. Para cumplir con esta tarea Dr DCOM utiliza la información obtenida anteriormente.

Por otra parte, la Base de Datos es la fuente de información para todos los programas y utilidades de una aplicación del ProcessView. Entre otras funciones: Recibe datos en tiempo real del OPC Cliente, compara estos datos con los límites de alarma definidos, envía los mensajes de alarmas a los destinos configurados y ajusta la salida según límites configurados.

La figura 30 muestra una porción de la base de datos de este ejemplo.

**Figura 30. Base de datos del OPC Server**





Cada bloque está asociado a un parámetro en el campo, y si el bloque permite escritura, se puede acceder directamente a dicho parámetro escribiendo en el campo correspondiente al valor actual. De igual forma cuando un bloque es instanciado en el Syscon, la comunicación entre el servidor OPC es automáticamente generada permitiendo que todos los parámetros sean acezados por el ProcessView, sin la necesidad de re-teclear el dato.

- Diseño de la interfaz gráfica: Una vez que está configurada la base de datos con la cual se tiene disponible la información que se quiere representar al operador en pantalla, es necesario desarrollar la misma. El GraphWorx es la herramienta que usa el ProcessView para diseñar las interfaces. Con el GraphWorx se tiene un entorno de trabajo similar al proporcionado por los editores gráficos conocidos, además ofrece un marco de dibujo completo que hace fácil el diseño de la interfaz grafica. El diseño se basa en utilizar dibujos preelaborados como fondo de la pantalla y sobre este fondo se disponen diferentes objetos dinámicos asociados a los bloques en la Base de Datos. Se pueden utilizar tanto ficheros \*.BMP como ficheros \*.ADF, \*.PCX y \*.VBA. Las propiedades de los objetos y pantallas se pueden modificar usando un editor de comandos e inspector de propiedades que permiten:

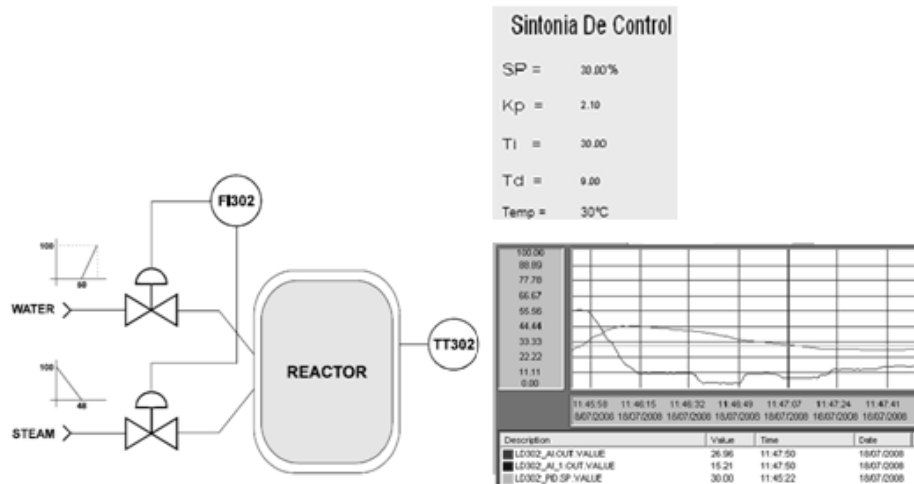
- Definir características de una pantalla (Display Properties, Commands on Opening, Command on Closing).
- Propiedades Dinámicas de objetos.
- Animaciones.
- Pulsadores.
- Macros, al ejecutar una serie de teclas.

En todos los casos el Editor de Comandos es el mismo. Al entrar en la configuración de las propiedades dinámicas de un objeto se puede definir la secuencia de comandos que ejecuten la función deseada en relación con dicho objeto. Otra herramienta del ProcessView es el TrendWorx por medio del cual se generar en tiempo real graficas o tendencias en función del tiempo de todos los tipos de variables que se manejan en la planta y además genera históricos de tendencias. También se hace uso del AlarmWorx para generar alarmas y reportes de alarmas dentro de la interfaz grafica.

- Modo de ejecución y funcionalidad de la aplicación: Para ejecutar la aplicación desarrollada con el programa GraphWorx de modo que se permita trabajar sobre los datos del proceso en tiempo real, se tiene la utilidad RunTime. RunTime es la herramienta con la que los ficheros creados en el GraphWorx (\*.gdf) pueden ser visualizados en la pantalla del operador. Para garantizar que la información se actualiza en tiempo real, la Base de Datos y el driver deben estar siempre funcionando, o sea las comunicaciones con los dispositivos de campo deben estar online.

A continuación se muestra la interfaz en la cual el usuario podrá gestionar las variables físicas de la planta y sintonizara las constantes de control. Al iniciar GraphWorx la pantalla principal es la mostrada en la figura 31.

**Figura 31. Pantalla principal del sistema de supervisión**

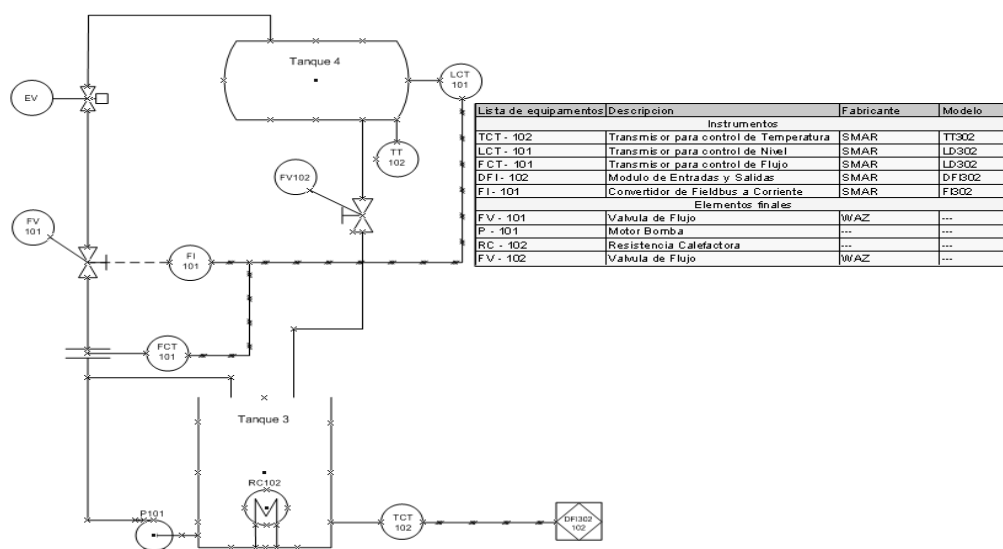


En esta interfaz se pueden acceder y modificar los parámetros del bloque del controlador tales como el SetPoint, Kp, Ti y el Td, al igual que la temperatura deseada en el sistema. De igual forma se podrán graficar la respuesta de dichos parámetros en el tiempo y verificar como actúan frente a cambios deseados, los cuales son digitados por el usuario, teniendo en cuenta las perturbaciones del sistema.

## 9. ESTRATEGIAS DE CONTROL CORRIENDO EN LA PLANTA DIDÁCTICA

En esta parte del proyecto, el objetivo principal ahora es poder diseñar e implementar a través de los bloques funcionales de los transmisores, 3 estrategias de control, que permitan realizar de una manera optimizada un control de las determinadas variables físicas que se manejan en la planta didáctica. También se utilizará y diseñará un sistema de supervisión para cada estrategia que permita gestionar los valores de sintonía de los controladores, alarmas, reportes, tendencias, al igual que el estado de las variables físicas de la planta y así como el estado de las variables de los controladores. Como anexo se hará uso de Matlab para realizar una comunicación con el OPC sever del System302, con el fin de poder enviar datos de los controladores de las estrategias y así poder obtener una identificación o modelo matemático (Función de transferencia) de la planta, además también se podrá obtener los índices de desempeño de los controladores que se utilizan en las estrategias. Las estrategias de control que se diseñaran e implementaran tendrán características de diferentes tipos de controladores estándar tales como controladores PID, Feedback, control en cascada, histéresis, ON/OFF, Control de alarmas, Control de fallos etc., donde se verán involucradas variables físicas tales como nivel, flujo, presión y temperatura. Las estrategias de control serán ejecutadas en una zona de la planta la cual cuenta con 2 estanques, 2 resistencias caloríficas, una bomba, 2 electroválvulas, 4 válvulas solenoides, transmisores de presión y de temperatura, y Conversores de Fieldbus a corriente. En la figura 32 presentamos un diagrama esquemático P&ID de la zona de la planta donde se implementaran las estrategias control.

**Figura 32. Esquema P&ID de una sección de la planta.**



## 9.1. ESTRATEGIA 1, CONTROL DE FLUJO

Esta primera estrategia busca poder controlar el flujo en porcentaje (0 – 100 %) de la válvula FV101, además se configura una alarma en caso de que el flujo pase o se encuentre por encima del 85%. Si el sistema se encuentra en estado de alarma, la señal de control pasa a un estado de seguridad haciendo que la electroválvula se cierre para evitar así el paso de flujo.

**9.1.1. Desarrollo de la estrategia.** La señal de flujo medida es comparada en un controlador con un SetPoint de flujo deseado, la salida del controlador es enviada a un bloque de salida análoga el cual va utilizar esa señal para manipular la electroválvula. Además el controlador recibe una señal de Tracking la cual se envía a la salida del controlador en caso de que se presente una alarma de sobre paso de flujo de un determinado rango.

Para implementar esta estrategia se utilizaron los siguientes instrumentos:

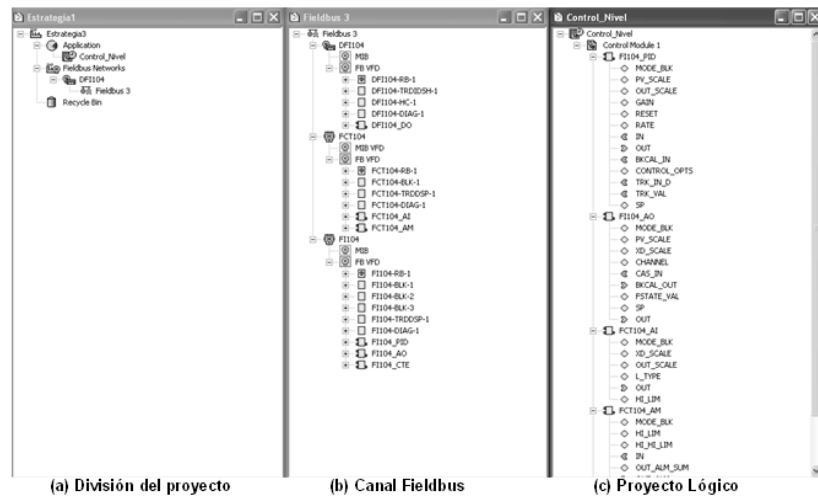
- 1) 1 LD302 : para medición de nivel (FCT104)
- 2) 1 conversor de Fieldbus a corriente, salidas análogas (4 – 20mA) (FI104)
- 3) 1 DFI302 para entradas y salidas digitales (0 – 24VDC), (DFI104)

**9.1.2. Configuración física y lógica de la estrategia.** Para el correcto funcionamiento de la estrategia, en cada transmisor se instanciaron bloques funcionales tales como:

- FCT104: un bloque de entrada análoga (Analog Input) y un bloque de alarma análoga (Analog Alarm).
- FI104: un bloque de salida análoga (Analog Output), un bloque de control (PID control) y un bloque constante (Constant).
- DFI104, en este se instancio dos bloques funcionales: dos bloques de salida digital (DO).

En la siguiente figura se muestra un esquema de la configuración física y lógica de la estrategia, utilizando el SYSCON.

**Figura 33. Configuración física y lógica de la estrategia 1**



Después de haber añadido los transmisores a la red H1 e instanciado los bloques funcionales para cada transmisor, estos deben de ser parametrizados añadiendo características funcionales a cada bloque para que estos en conjunto con otros bloques trabajen en función de la estrategia de control.

En la siguiente tabla se muestra la parametrización de cada bloque funcional que fue instanciado en cada transmisor:

**Tabla10. Parametrización de los bloques funcionales de la estrategia 1**

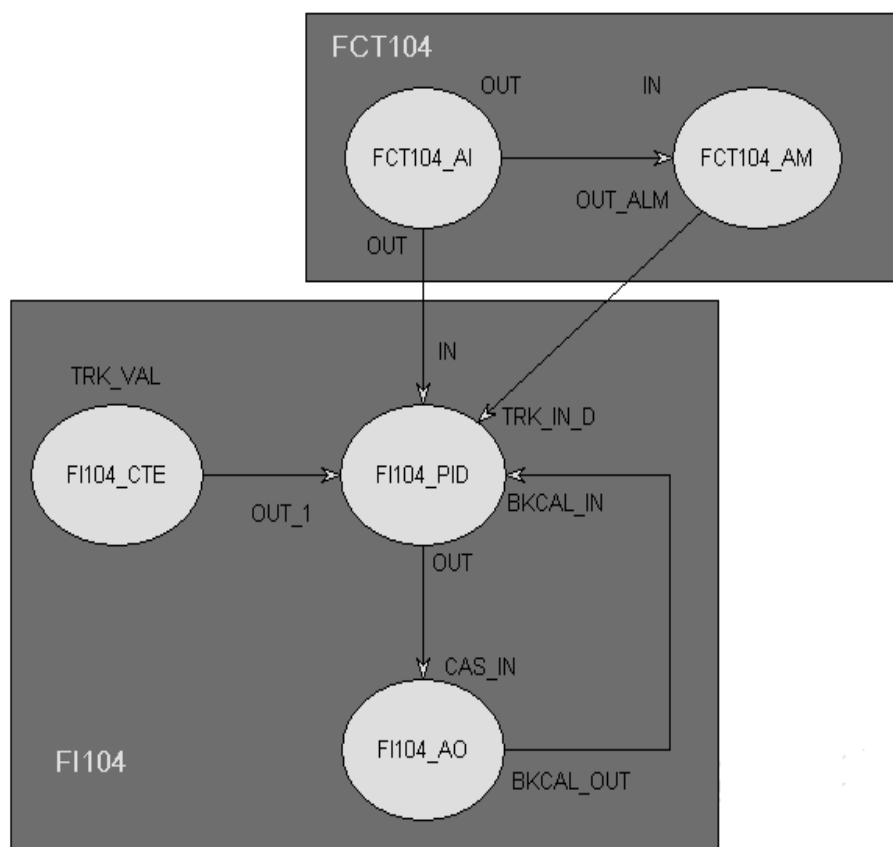
Dispositivo	Bloque	Tag del Bloque	Parámetro	Valor
LD302 (FCT104)	RB (Resource Block)	FCT104-RB-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	BLOCK (Transducer)	FCT104-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	DSP(Display)	FCT104-TRDDSP-1	MODE_BLK.Target	AUTO
			BLOCK_TAG_PARAM_1	FCT104_AI
			INDEX_RELATIVE_1	8
			MNEMONIC_1	%
			ACCESS_1	MONITORING
			ALPHA_NUM_1	MNEMONIC
			DISPLAY_REFRESH	UPDATE DISPLAY
	AI(Analog Input)	FCT104_AI	MODE_BLK.Target	AUTO
			XD-SCALE.EU_100	148
			XD-SCALE.EU_0	2.11
			XD-SCALE.UNITS_INDEX	inH2O
			OUT-SCALE.EU_100	100
			OUT-SCALE.EU_0	0
			OUT-SCALE.UNITS_INDEX	%
			CHANEL	1
			L_TYPE	Indirect, square root
			HI_LIM	85
	AM(Analog Alarm)	LCT104_AM	MODE_BLK.argetT	AUTO
			HI_LIM	85
			HI_HI_LIM	90
			OUT_ALAM_SUM	HI

**Continuación tabla 10**

Dispositivo	Bloque	Tag del Bloque	Parámetro	Valor
FI302 (FI104)	RB (Resource Block)	FCT104-RB-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	BLOCK (Transducer)	FCT104-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	DSP(Display)	FI103TRDDSP-1	TERMINAL_NUMBER	1
			MODE_BLK.Target	AUTO
			BLOCK_TAG_PARAMETER_1	FI104_AI
			INDEX_RELATIVE_1	9
			MNEMONIC_1	mA
			ACCESS_1	MONITORING
			ALPHA_NUM_1	MNEMONIC
			DISPLAY_REFRESH	UPDATE DISPLAY
	AO(Analog Output)	FI104_AO	MODE_BLK.Target	CAS
			PV-SCALE.EU_100	100
			PV-SCALE.EU_0	0
			PV-SCALE.UNITS_INDEX	%
	PID(Control PID)	FI104_PID	XD-SCALE.EU_100	20
			XD-SCALE.EU_0	4
			XD-SCALE.UNITS_INDEX	mA
			CHANEL	1
			MODE_BLK.Target	AUTO
			CONTROL_OPTS	Track Enable
			PV-SCALE.EU_100	100
			PV-SCALE.EU_0	0
DFI302(DFI104)	CTE(Constant)	FI104_CTE	PV-SCALE.UNITS_INDEX	%
			OUT-SCALE.EU_100	100
			OUT-SCALE.EU_0	0
			OUT-SCALE.UNITS_INDEX	%
	RB (Resource Block)	DFI104-RB-1	GAIN	1.5
			RESET	12
			RATE	2.5
			MODE_BLK.Target	AUTO
DFI302(DFI104)	BLOCK (Transducer)	DFI104-BLK-1	CT_VAL_1	0
			MODE_BLK.Target	AUTO
			MODE_BLK.Target	AUTO
			MODE_BLK.Target	AUTO
DFI302(DFI104)	HC(Hardware Configuration)	DFI104-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
			MODE_BLK.Target	AUTO
			MODE_BLK.Target	AUTO
			MODE_BLK.Target	AUTO
DFI302(DFI104)	DO(Digital Output)	DFI105-DO-1	MODE_BLK.Target	AUTO
			CHANEL	1211

Después de haber parametrizados todos los bloques funcionales, estos se arrastran a la ventana de la estrategia y se enlazan para así implementar y configurar la estrategia propuesta. En la siguiente figura se muestra la implementación de la Estrategia 1.

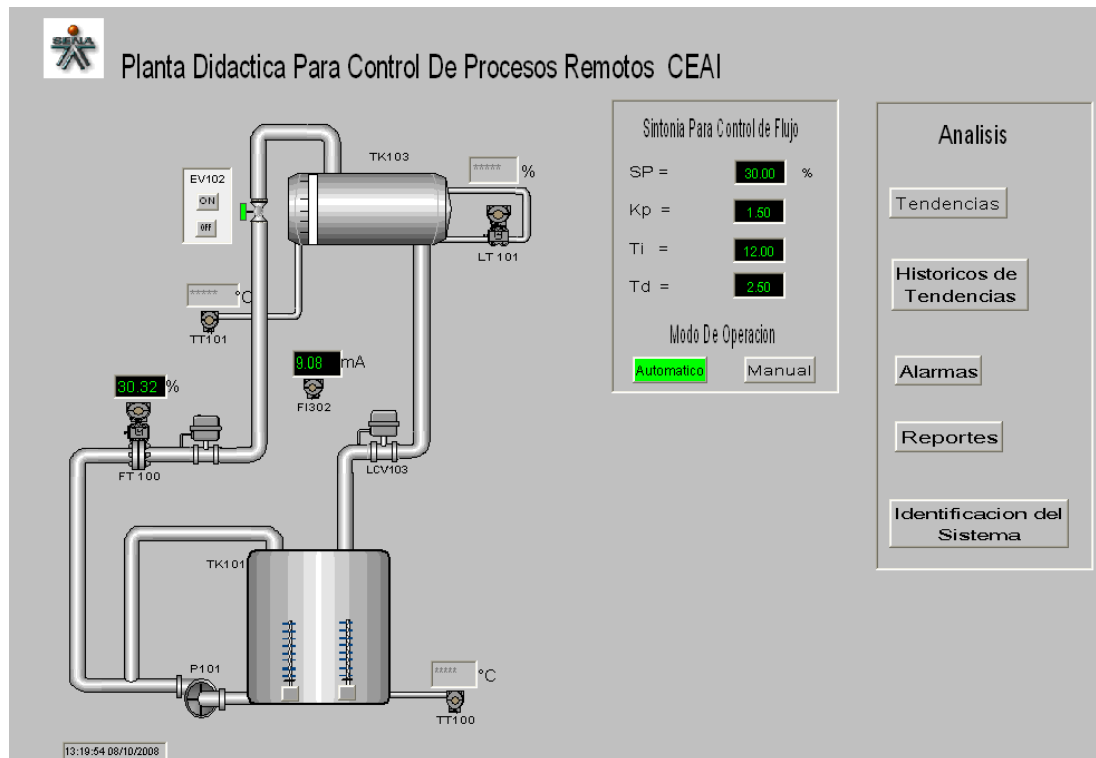
**Figura 34. Implementación de la estrategia 1**



**9.1.3. Sistema de Supervisión.** Como ya se ha dicho antes, el sistema o estación de supervisión se configura por medio del ProcessView del System302.

A continuación se muestra la interfaz grafica la cual representa la estación de gestión, donde el usuario podrá gestionar las variables físicas de la planta y sintonizara las constantes de control de la estrategia 1. Al iniciar GraphWorx la pantalla principal es la mostrada en la figura 35.

**Figura 35. Pantalla principal del sistema de supervisión**



En esta interfaz se pueden acceder y modificar los parámetros del bloque (PID), tales como el SetPoint, Kp, Ti y el Td, al igual que el modo del controlador ya sea manual o automático el cual se utiliza en caso de que se desee sintonizar el controlador en lazo abierto. Además la interfaz grafica dispone de cinco botones los cuales le permiten al operador entender mejor el funcionamiento del sistema a controlar y así aumentar el rendimiento y desempeño de la estrategia.

Pero antes de empezar a controlar el sistema, es necesario sintonizar los parámetros de los controladores de la estrategia implementada.

**9.1.4. Sintonía del controlador.** Para lograr realizar el control de flujo se utilizo método de sintonización de Ziegler y Nichols con el fin de determinar los parámetros del controlador PID.

La sintonización se realizo en lazo cerrado, en donde el procedimiento original es llevar el sistema de control al límite de la estabilidad, utilizando un controlador proporcional, para determinar los parámetros  $K_u$  y  $T_u$ , es decir se varia la ganancia (Kp) del controlador hasta que el sistema entra en oscilación como se muestra en la figura 37.

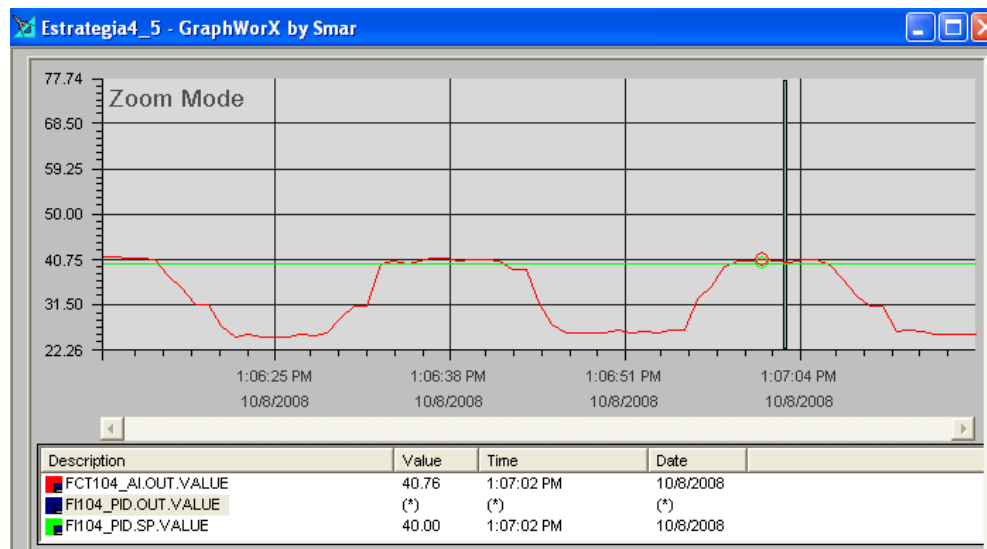


**Figura 36. Sintonía del controlador**



Cuando el sistema muestra esta oscilación como en la figura 37, se toma la medición del periodo de oscilación  $T_u$  (Periodo Ultimo) y el valor de ganancia ultima  $K_u$ , con el fin de reemplazar estos valores en las formulas de Ziegler y Nichols ya establecidas y así poder calcular los parámetros de ganancia, integral y derivativo del controlador.

**Figura 37. Sistema oscilando**



#### 9.1.5. Calculo de sintonía. Valores identificados:

$$K_u = 5$$

$$P_u = 25 \text{ seg}$$

Calculo de la ganancia ( $K_p$  - Gain)

$$Kc = 0,3 * Ku$$

$$Kc = 0,3 * 5 = 1,5$$

Calculo de la tiempo integral (Ti - Reset)

$$Ti = \frac{Pu}{4} = \frac{25seg}{4} = 6,25$$

Calculo del tiempo derivativo (Td - Rate)

$$Td = \frac{Pu}{4} = \frac{25seg}{4} = 6,25$$

Ahora se remplazan estos parámetros de control en las variables Kp, Ti y Td de la interfaz de supervisión, y se da un SetPoint de 30% para verificar la respuesta del sistema con el controlador previamente sintonizado.

Con el fin de lograr una mejor repuesta de controlador se varían los parámetros de control hasta obtener una mejor repuesta del sistema, dichos parámetros se aproximaron a los siguientes valores:

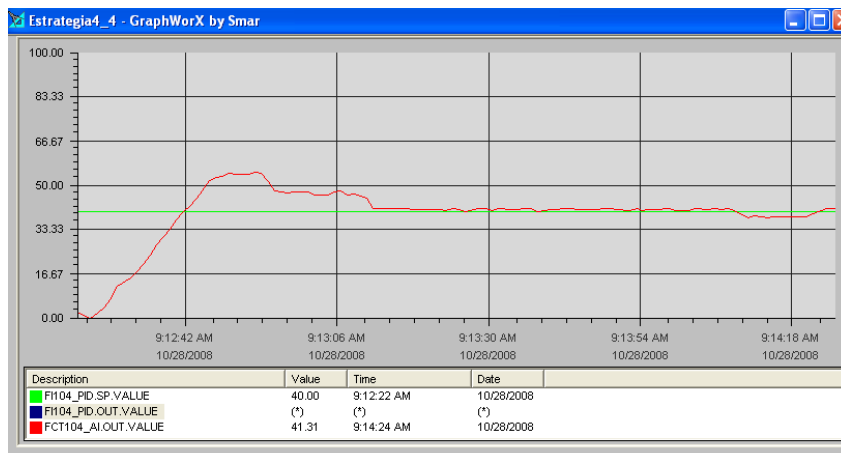
$$Kp = 1,5$$

$$Ti \approx 12,5$$

$$Td \approx 2,5$$

En la figura 33 se observa los parámetros de control obtenidos, y también se representamos la respuesta del sistema en el grafico de tendencias. Grafica en función del tiempo.

**Figura 38. Sistema sintonizado**



Sintonía Para Control de Flujo

SP =  %

Kp =

Ti =

Td =

Modo De Operación

**9.1.6. Criterios de desempeño.** Con el propósito de lograr y obtener la mejor eficiencia en cuanto al funcionamiento del controlador de la estrategia 1, para esto se realizó una aplicación la cual nos permite obtener los índices de desempeño del controlador. **Ver anexo B.**

Después de haber sintonizado el controlador se disponen a obtener los criterios de desempeño de controlador. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de desempeño y los valores de sintonía del controlador, incluyendo el sobrepaso, el error de estado estacionario y el tiempo de estabilización.

**Tabla 11. Parámetros, criterios de desempeño de control de la estrategia 1**

CONTROLADOR	KP	TI	TD	ERR	MP	TSS	IAE	EFC
PID	1.50	12seg	2.50seg	0%	12%	26seg	14.50%	54.32%

**9.1.7. Identificación del sistema.** También se logró obtener el modelo matemático y estimación del sistema que se está controlando con la estrategia de control. **Ver anexo A**

## **9.2. ESTRATEGIA 2, CONTROL DE NIVEL**

Esta segunda estrategia busca poder controlar el nivel en porcentaje (0 – 100 %) del tanque 4, manipulando el flujo de entrada de agua al estanque 4 (control de la electroválvula FV101), además se configura una alarma en caso de que el nivel pase o se encuentre por encima del 85%. Si el sistema se encuentra en estado de alarma, la señal de control pasa a un estado de seguridad haciendo que la electroválvula se cierre para evitar así el paso de flujo de agua.

**9.2.1. Desarrollo de la estrategia.** La señal de nivel medida es comparada en un controlador con un SetPoint de nivel deseado, la salida del controlador es enviada a un bloque de salida analógica el cual va a utilizar esa señal para manipular el flujo de entrada de agua al estanque 4. Además el controlador recibe una señal de Tracking la cual se envía a la salida del controlador en caso de que se presente una alarma de sobre paso de nivel de un determinado rango. Para implementar esta estrategia se utilizaron los siguientes instrumentos:

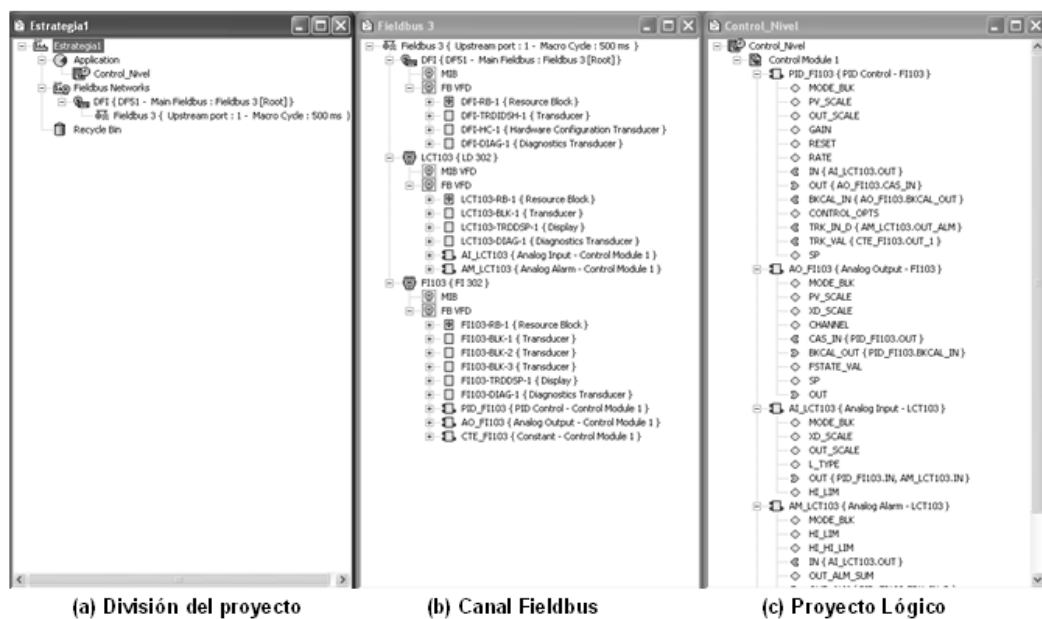
- 1) 1 LD302 : para medición de nivel (LCT103).
- 2) 1 conversor de Fieldbus a corriente, salidas analógicas (4 – 20mA) (FI103).
- 3) 1 DFI302 para entradas y salidas digitales (0 – 24VDC).

**9.2.2. Configuración física y lógica de la estrategia.** Para el correcto funcionamiento de la estrategia, en cada transmisor se instanciaron bloques funcionales tales como:

- LCT103: un bloque de entrada análoga (Analog Input) un bloque de alarma análoga (Analog Alarm).
- FI103: un bloque de salida análoga (Analog Output), un bloque de control (PID control), y un bloque constante (Constant).
- DFI302, en este se instancio dos bloques funcionales: dos bloques de salida digital (DO).

En la siguiente figura se muestra un esquema de la configuración física y lógica de la estrategia, utilizando el SYSCON.

**Figura 39. Configuración física y lógica de la estrategia 2**



Después de haber añadido los transmisores a la red H1 e instanciado los bloques funcionales para cada transmisor, estos deben de ser parametrizados añadiendo características funcionales a cada bloque para que estos en conjunto con otros bloques trabajen en función de la estrategia de control.

En la siguiente tabla se muestra la parametrización de cada bloque funcional que fue instanciado en cada transmisor:

**Tabla 12. Parametrización de los bloques funcionales de la estrategia 2**

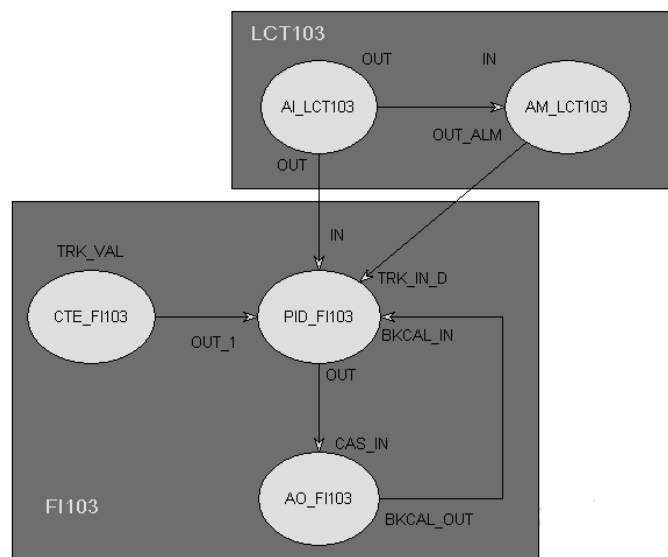
Dispositivo	Bloque	Tag del Bloque	Parámetro	Valor
LD302 (LCT103)	RB (Resource Block)	LCT103-RB-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	BLOCK (Transducer)	LCT103-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	DSP(Display)	LCT103-TRDDSP-1	MODE_BLK.Target	AUTO
			BLOCK_TAG_PARAM_1	LCT103_AI
			INDEX_RELATIVE_1	8
			MNEMONIC_1	%
			ACCESS_1	MONITORING
			ALPHA_NUM_1	MNEMONIC
			DISPLAY_REFRESH	UPDATE DISPLAY
	AI(Analog Input)	AI_LCT103	MODE_BLK.Target	AUTO
			XD-SCALE.EU_100	7.5
			XD-SCALE.EU_0	0.81
			XD-SCALE.UNITS_INDEX	inH2O
			OUT-SCALE.EU_100	100
			OUT-SCALE.EU_0	0
			OUT-SCALE.UNITS_INDEX	%
	AM(Analog Alarm)	AM_LCT103	CHANEL	1
			L_TYPE	Indirect
			HI_LIM	85
			MODE_BLK.argetT	AUTO
			HI_LIM	85
			HI_HI_LIM	90
			OUT_ALAM_SUM	HI
FI302 (FI103)	RB (Resource Block)	FCT103-RB-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	BLOCK (Transducer)	FCT103-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	DSP(Display)	FI103TRDDSP-1	TERMINAL_NUMBER	1
			MODE_BLK.Target	AUTO
			BLOCK_TAG_PARAM_1	FI103_AI
			INDEX_RELATIVE_1	9
			MNEMONIC_1	mA
			ACCESS_1	MONITORING
	AO(Analog Output)	AO_FI103	ALPHA_NUM_1	MNEMONIC
			DISPLAY_REFRESH	UPDATE DISPLAY
			MODE_BLK.Target	CAS
			PV-SCALE.EU_100	100
			PV-SCALE.EU_0	0
			PV-SCALE.UNITS_INDEX	%
			XD-SCALE.EU_100	20
	PID(Control PID)	PID_FI103	XD-SCALE.EU_0	4
			XD-SCALE.UNITS_INDEX	mA
			CHANEL	1
			MODE_BLK.Target	AUTO
			CONTROL_OPTS	Track Enable
			PV-SCALE.EU_100	100
			PV-SCALE.EU_0	0
	CTE(Constant)	CTE_FI103	PV-SCALE.UNITS_INDEX	%
			OUT-SCALE.EU_100	100
			OUT-SCALE.EU_0	0
			OUT-SCALE.UNITS_INDEX	%
			GAIN	2.10
			RESET	30
			RATE	9.0
			MODE_BLK.Target	AUTO
			CT_VAL_1	0

Continuación tabla 12

Dispositivo	Bloque	Tag del Bloque	Parámetro	Valor
DFI302(DFI103)	RB (Resource Block)	DFI103-RB-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	BLOCK (Transducer)	DFI103-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	HC(Hardware Configuration)	DFI103-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	DO(Digital Output)	DFI103-DO-1	MODE_BLK.Target	AUTO
			CHANEL	1211

Después de haber parametrizados todos los bloques funcionales, estos se arrastran a la ventana de la estrategia y se enlazan para así implementar y configurar la estrategia propuesta. En la siguiente figura se muestra la implementación de la Estrategia 2.

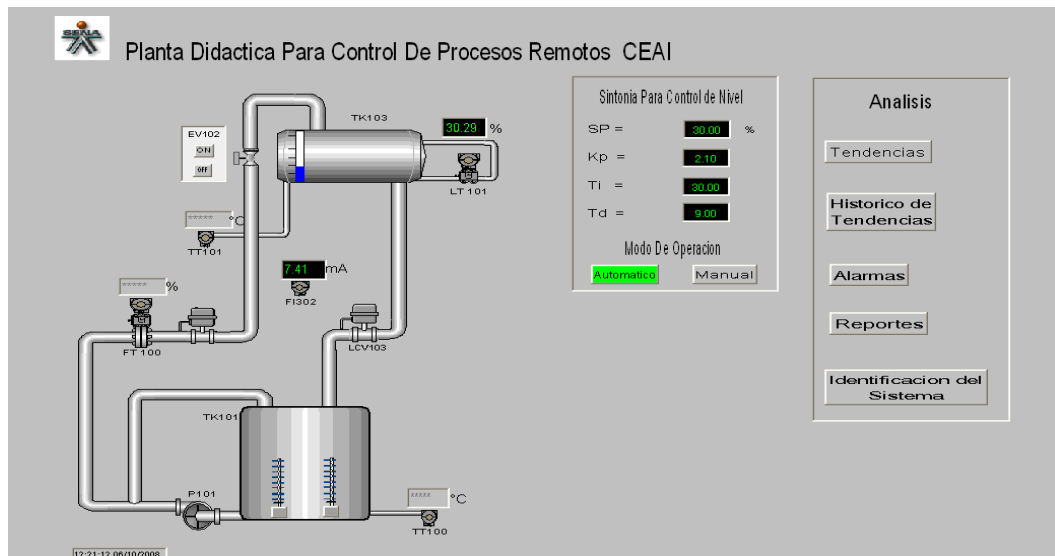
**Figura 40. Implementación de la estrategia 2**



**9.2.3. Sistema de Supervisión.** Como ya se ha dicho antes, el sistema o estación de supervisión se configura por medio del ProcessView del System302.

A continuación se muestra la interfaz grafica la cual representa la estación de gestión, donde el usuario podrá gestionar las variables físicas de la planta y sintonizar las constantes o parámetros de control. Al iniciar GraphWorx la pantalla principal es la mostrada en la figura 41.

**Figura 41. Pantalla principal del sistema de supervisión**



En esta interfaz se pueden acceder y modificar los parámetros del bloque (PID), tales como el SetPoint, Kp, Ti y el Td, al igual que el modo del controlador ya sea manual o automático el cual se utiliza en caso de que se desee sintonizar el controlador en lazo abierto.

Al igual que en la estrategia 1, la sintonía del controlador de la estrategia 2 se realiza a través del método de sintonización de Ziegler y Nichols en lazo cerrado, asignando parámetros de ganancia al controlador hasta que este empieza a oscilar y así poder medir y tomar los valores de Ku (K ultima) y Tu (T ultimo). Con estos valores ya obtenidos se reemplazan en las formulas de Ziegler y Nichols ya establecidas y así poder calcular los parámetros de ganancia, tiempo integral y derivativo del controlador

#### 9.2.4. Calculo de sintonía. Valores identificados:

$$K_u = 7$$

$$P_u = 80 \text{ seg}$$

Calculo de la ganancia (Kp - Gain)

$$K_c = 0,3 * K_u$$

$$K_c = 0,3 * 7 = 2,1$$

Calculo de la tiempo integral (Ti - Reset)

$$T_i = \frac{P_u}{4} = \frac{80 \text{ seg}}{4} = 20$$

Calculo del tiempo derivativo (Td - Rate)

$$Td = \frac{Pu}{4} = \frac{80seg}{4} = 20$$

Ahora se rempazan estos parámetros de control en las variables Kp, Ti y Td de la interfaz de supervisión, y se da un SetPoint de 30% para verificar la respuesta del sistema con el controlador previamente sintonizado.

Con el fin de lograr una mejor repuesta de controlador se varían los parámetros de control hasta obtener una mejor repuesta del sistema, dichos parámetros se aproximaron a los siguientes valores:

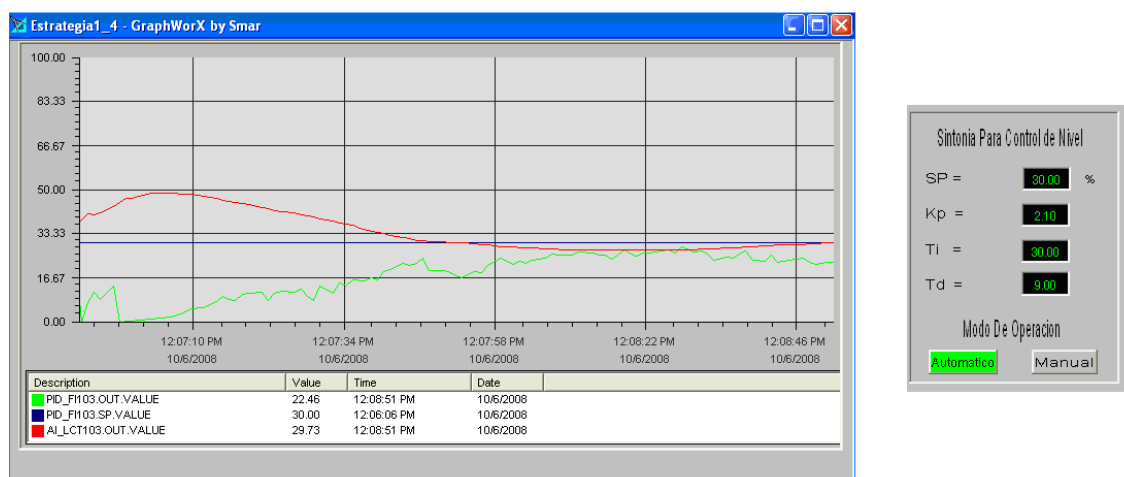
$$Kp = 2,1$$

$$Ti \approx 9$$

$$Td \approx 30$$

Con los parámetros de sintonía ya establecidos, estos se ajustan en la interfaz grafica como se muestra en la figura 41, y se asigna un SetPoint de 30% para poder observar la respuesta del sistema.

**Figura 42. Respuesta del sistema en la estrategia 2**



**9.2.5. Criterios de desempeño.** Al igual que en la estrategia 1, en la estrategia dos se desea lograr y obtener la mejor eficiencia en cuanto al funcionamiento del controlador de la estrategia 2, para esto se realizo una aplicación la cual nos permite obtener los índices de desempeño del controlador. **Ver anexo B.**

Después de haber sintonizado el controlador se disponen ha obtener los criterios de desempeño de controlador. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de desempeño y los valores de sintonía del controlador, incluyendo el sobrepaso, el error de estado estacionario y el tiempo de estabilización.



**Tabla13. Parámetros, criterios de desempeño de control de la estrategia 2**

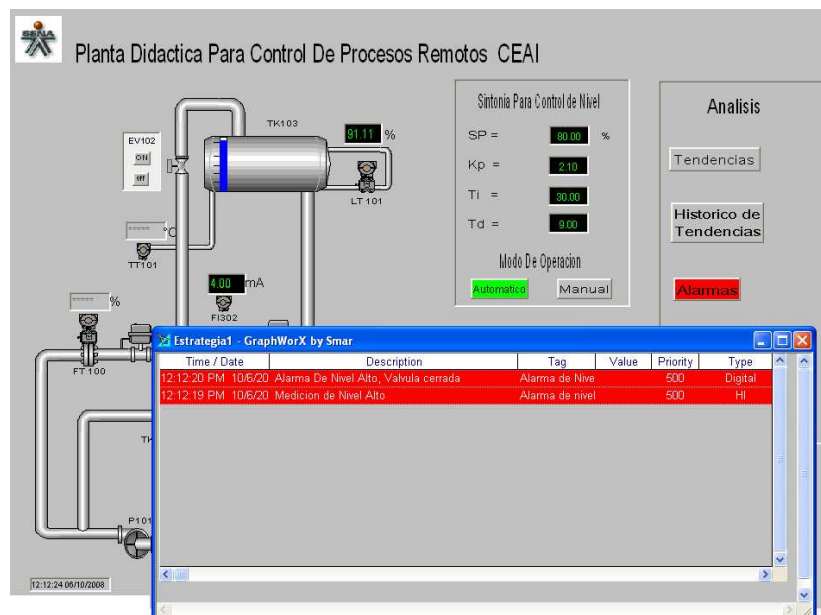
CONTROLADOR	KP	TI	TD	ERR	MP	TSS	IAE	EFC
PID	2.1	30seg	9seg	0%	16%	30seg	9.78%	32.10%

**9.2.6. Identificación del sistema.** Taímen se logro obtener el modelo matemático y estimación del sistema que se esta controlando con la estrategia de control. **Ver anexo A**

Como se ha podido observar, la interfaz grafica de las estrategias nos permiten además de visualizar el proceso, observar a través de gráficos de tendencia la repuesta de las señales medidas en función del tiempo, tales como analizar la respuesta del sistema a diferentes entradas de SetPoint en el controlador, como se pudo ver en la figura 42. La interfaz también cuenta con otras funcionalidades tales como históricos de tendencia, alarmas, reportes e identificación del sistema:

- **Histórico de tendencias:** permite guardar, las señales medidas en función del tiempo, para realizar un análisis de la respuesta del sistema en tiempos pasados.
- **Alarmas:** permite visualizar en tiempo real las alarmas que fueron configuradas en el SYSCON, indicando en modo grafico situaciones en donde el nivel del tanque 4 sobrepasa un determinado porcentaje, en nuestro caso este límite es del 85%. Al presentarse la alarma, la estrategia de control activa un sistema de seguridad que hace que la válvula de flujo se cierre.

**Figura 43. Alarmas configuradas en la estrategia 2**



Reportes: permite guardar en una base de datos, y presentar en archivos PDF, todos los eventos relacionados con las alarmas que se presenten en el sistema a controlar, estos archivos contienen y guardan información como: el operario que se encontraba haciendo uso de la planta en el momento de la alarma, la hora y fecha de la alarma, el mensaje de alarma, el tipo de falla que se presento y el estado de la alarma entre otras. En la siguiente figura se muestra un reporte de diferentes alarmas y eventos que han ocurrido en el funcionamiento de la planta.

**Figura 44. Reportes de alarmas y eventos de la estrategia 2**

# Reportes de Alarmas

## Condensed Alarm Report [Est1\_Configuration]

lunes, 6 octubre, 2008

12:13:37

Filters used: Anonymous Filter & Top 100000 records.

Selection Criteria: ([Event Type] IN ('Condition'))

Message	Time	Event Type	Quality	Helman
Medicion de Nivel Alto	10/6/2008 11:25:08 AM	Condition	GOOD	
Alarma De Nivel Alto, Valvul	10/6/2008 11:08:56 AM	Condition	GOOD	
Nivel Normal, Valvula en Est	10/6/2008 11:10:43 AM	Condition	GOOD	
Medicion de Nivel Normal	10/6/2008 11:10:43 AM	Condition	GOOD	
Alarma De Nivel Alto, Valvul	10/6/2008 11:21:28 AM	Condition	GOOD	
Medicion de Nivel Alto	10/6/2008 11:21:28 AM	Condition	GOOD	
Medicion de Nivel Alto	10/6/2008 11:08:55 AM	Condition	GOOD	
Medicion de Nivel Normal	10/6/2008 11:21:49 AM	Condition	GOOD	
Nivel Normal, Valvula en Est	10/6/2008 12:12:49 PM	Condition	GOOD	
Alarma De Nivel Alto, Valvul	10/6/2008 11:25:10 AM	Condition	GOOD	
Medicion de Nivel Normal	10/6/2008 11:27:56 AM	Condition	GOOD	
Nivel Normal, Valvula en Est	10/6/2008 11:27:58 AM	Condition	GOOD	
Medicion de Nivel Alto	10/6/2008 12:12:19 PM	Condition	GOOD	
Alarma De Nivel Alto, Valvul	10/6/2008 12:12:20 PM	Condition	GOOD	
Medicion de Nivel Normal	10/6/2008 12:12:48 PM	Condition	GOOD	
Nivel Normal, Valvula en Est	10/6/2008 11:21:49 AM	Condition	GOOD	

### 9.3 ESTRATEGIA 3, CONTROL EN CASCADA

Esta tercera estrategia busca poder implementar un controlador en cascada donde se permita medir o sensar el nivel del estanque 4 y el flujo de la válvula FV101 en un rango de (0 – 100%), con el fin de lograr controlar el nivel del estanque 4, manipulando el flujo de entrada de agua al estanque.

En la estrategia también se debe poder controlar las perturbaciones que entren al sistema tales como el cambio de la velocidad de la bomba P101, y la variación del flujo de salida de agua del estanque 4 manipulando la electroválvula FV102.

En cuanto al sistema de supervisión este debe permitir visualizar todas las variables físicas que se acondicionan en cada transmisor, poner los controladores en modo manual o automático con el fin de sintonizarlos, visualizar tendencias y finalmente una aplicación que modele e identifique el sistema por medio de una ecuación matemática y además permita obtener los índices de desempeño de los controladores de la estrategia.

**9.3.1. Desarrollo de la estrategia.** En esta estrategia el nivel medido del tanque 4 será enviado para el controlador maestro donde será comparado con un SetPoint de nivel. La salida del maestro será el SetPoint del controlador esclavo, que enviara una señal para la electroválvulas a través de un bloque de salida análoga, y este por su parte controlara el flujo de agua que llega al estanque 4. Para implementar esta estrategia se utilizaron los siguientes instrumentos:

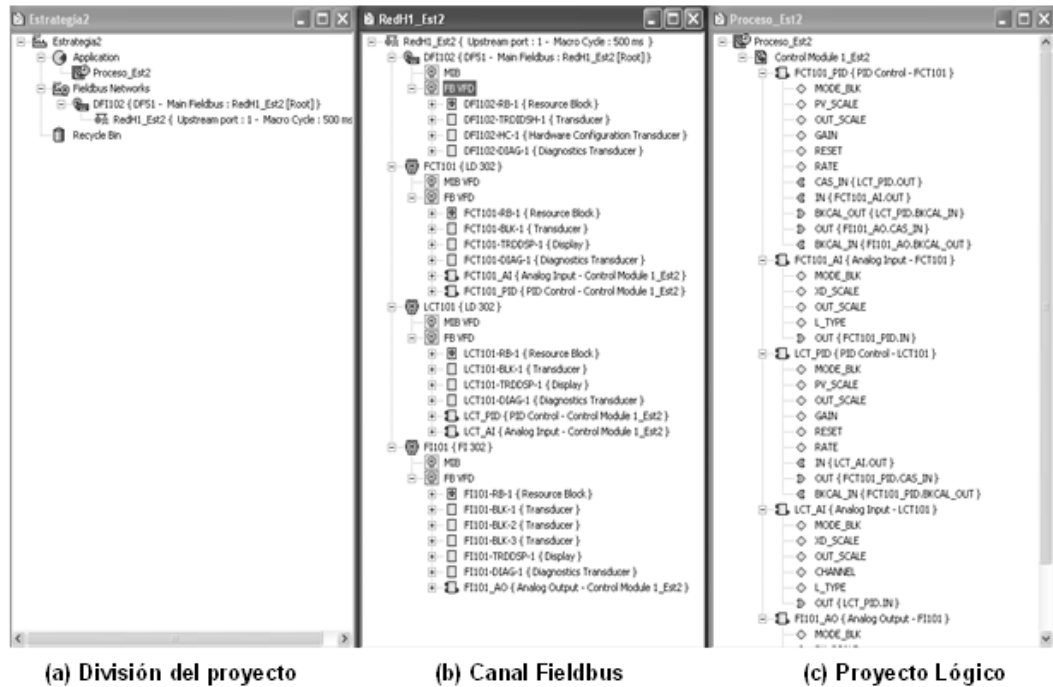
- 1 LD302: para medición de flujo (FCT101).
- 2. 1 LD302: para medición de nivel (LCT101).
- 3. 1 conversor de Fieldbus a corriente, salidas análogas (4 – 20mA) (FI101).
- 4. 1 DFI302 para entradas y salidas digitales (0 – 24VDC).

**9.3.2. Configuración física y lógica de la estrategia.** Para el correcto funcionamiento de la estrategia, en cada transmisor se instanciaron bloques funcionales tales como:

- FCT101: un bloque de entrada análoga (AI) y un bloque de control (PID).
- LCT101: un bloque de entrada análoga (AI) y un bloque de control (PID).
- FI101: un bloque de salida análoga (AO).
- DFI302, en este se instancio dos bloques funcionales: dos bloques de salida digital (DO).

En la siguiente figura se muestra un esquema de la configuración física y lógica de la estrategia, utilizando el SYSCON.

**Figura 45. Configuración física y lógica de la estrategia 3**



Después de haber añadido los transmisores a la red H1 e instanciado los bloques funcionales para cada transmisor, estos deben de ser parametrizados añadiendo características funcionales a cada bloque para que estos en conjunto con otros bloques trabajen en función de la estrategia de control. En la siguiente tabla se muestra la parametrización de cada bloque funcional que fue instanciado en cada transmisor:

**Tabla 14. Parametrización de los bloques funcionales de la estrategia 3**

Dispositivo	Bloque	Tag del Bloque	Parámetro	Valor
LD302 (FCT101)	RB (Resource Block)	FCT101-RB-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	BLOCK (Transducer)	FCT101-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	DSP(Display)	FCT101TRD DSP-1	MODE_BLK.Target	AUTO
			BLOCK_TAG_PARAM_1	FCT101_AI
			INDEX_RELATIVE_1	8
			MNEMONIC_1	%
			ACCESS_1	MONITORING
			ALPHA_NUM_1	MNEMONIC
			DISPLAY_REFRESH	UPDATE DISPLAY
	AI(Analog Input)	FCT101_AI	MODE_BLK.Target	AUTO
			XD-SCALE.EU_100 XD-SCALE.EU_0 XD-SCALE.UNITS_INDEX	148 2.11 inH2O
			OUT-SCALE.EU_100 OUT-SCALE.EU_0 OUT-SCALE.UNITS_INDEX	100 0 %
			CHANEL	1
			L_TYPE	Indirect, square root
	PID(Control PID)	FCT101_PID	MODE_BLK.Target	CAS
			PV-SCALE.EU_100 PV-SCALE.EU_0 PV-SCALE.UNITS_INDEX	100 0 %
			OUT-SCALE.EU_100 OUT-SCALE.EU_0 OUT-SCALE.UNITS_INDEX	100 0 %
			GAIN	1.5
			RESET	12
			RATE	2.5

Continuación tabla 14

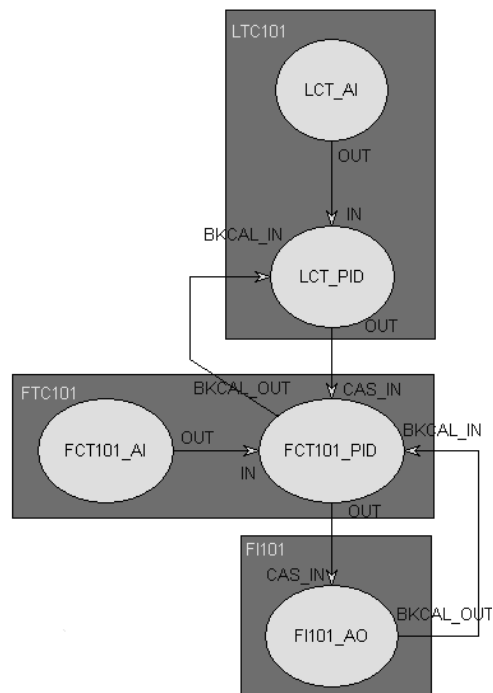
Dispositivo	Bloque	Tag del Bloque	Parámetro	Valor
LD302 (LCT101) LD302 (LCT101)	RB (Resource Block)	LCT101-RB-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	BLOCK (Transducer)	LCT101-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	DSP(Display)	LCT101TRD DSP-1	MODE_BLK.Target	AUTO
			BLOCK_TAG_PARM_1	LCT101_AI
			INDEX_RELATIVE_1	8
			MNEMONIC_1	%
			ACCESS_1	MONITORING
			ALPHA_NUM_1	MNEMONIC
			DISPLAY_REFRESH	UPDATE DISPLAY
	AI(Analog Input)	LCT101_AI	MODE_BLK.Target	AUTO
			XD-SCALE.EU_100 XD-SCALE.EU_0 XD-SCALE.UNITS_INDEX	7.5 0.81 inH2O
			OUT-SCALE.EU_100 OUT-SCALE.EU_0 OUT-SCALE.UNITS_INDEX	100 0 %
			CHANNEL	1
			L_TYPE	Indirect
	PID(Control PID)	LCT101_PID	MODE_BLK.Target	AUTO
			PV-SCALE.EU_100 PV-SCALE.EU_0 PV-SCALE.UNITS_INDEX	100 0 %
			OUT-SCALE.EU_100 OUT-SCALE.EU_0 OUT-SCALE.UNITS_INDEX	100 0 %
			GAIN	2.10
			RESET	30
			RATE	9.0

Continuación tabla 14

Dispositivo	Bloque	Tag del Bloque	Parámetro	Valor
FI302 (FI101)	RB (Resource Block)	FCT101-RB-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	BLOCK (Transducer)	FCT101-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	DSP(Display)	FI101TRDDSP-1	TERMINAL_NUMBER	1
			MODE_BLK.Target	AUTO
			BLOCK_TAG_PARA M_1	FI101_AI
			INDEX_RELATIVE_1	9
			MNEMONIC_1	mA
			ACCESS_1	MONITORING
			ALPHA_NUM_1	MNEMONIC
			DISPLAY_REFRESH	UPDATE DISPLAY
	AO(Analog Output)	FI101_AI	MODE_BLK.Target	CAS
			PV-SCALE.EU_100 PV-SCALE.EU_0 PV-SCALE.UNITS_INDE X	100 0 %
			XD-SCALE.EU_100 XD-SCALE.EU_0 XD-SCALE.UNITS_INDE X	20 4 mA
			CHANEL	1
Dispositivo	Bloque	Tag del Bloque	Parámetro	Valor
DFI302(DFI101)	RB (Resource Block)	DFI101-RB-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	BLOCK (Transducer)	DFI101-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	HC(Hardware Configuration)	DFI101-BLK-1	MODE_BLK.Target	AUTO
	DO(Digital Output)	DFI101-DO-1	MODE_BLK.Target	AUTO
			CHANEL	1211

Después de haber parametrizados todos los bloques funcionales, pasamos a enlazar los bloques para así implementar la estrategia propuesta, en la siguiente figura se muestra la implementación de la Estrategia 3.

**Figura 46. Implementación de la estrategia 3**



**9.3.3. Configuración del Sistema de Supervisión.** Como ya se ha dicho antes, el sistema o estación de supervisión se configura por medio del ProcessView del System302.

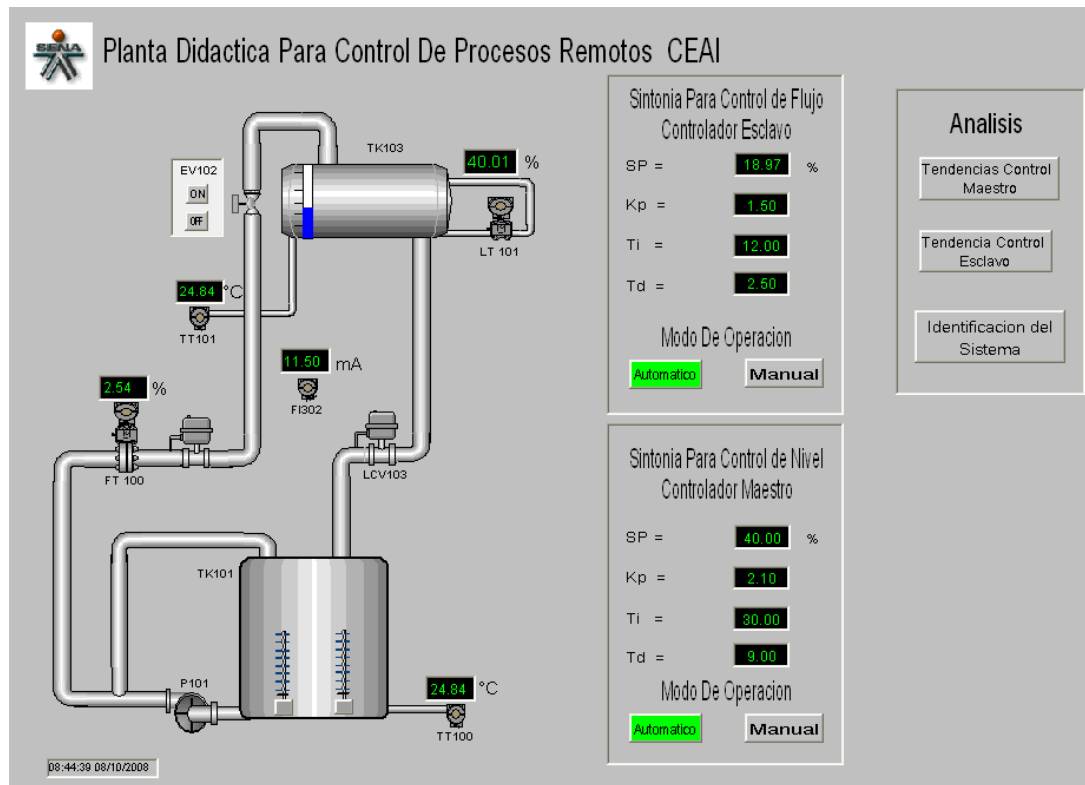
A continuación se muestra la interfaz en la cual el usuario podrá gestionar las variables físicas de la planta y sintonizar las constantes de control.

Debido a que en las dos estrategias anteriores los parámetros de sintonía de los controladores ya se obtuvieron a través del método de sintonización de Zieger y Nichols, solo se reemplazan para luego introducir valores del SetPoint al sistema.

Al iniciar GraphWorx la pantalla principal es la mostrada en la figura 47.

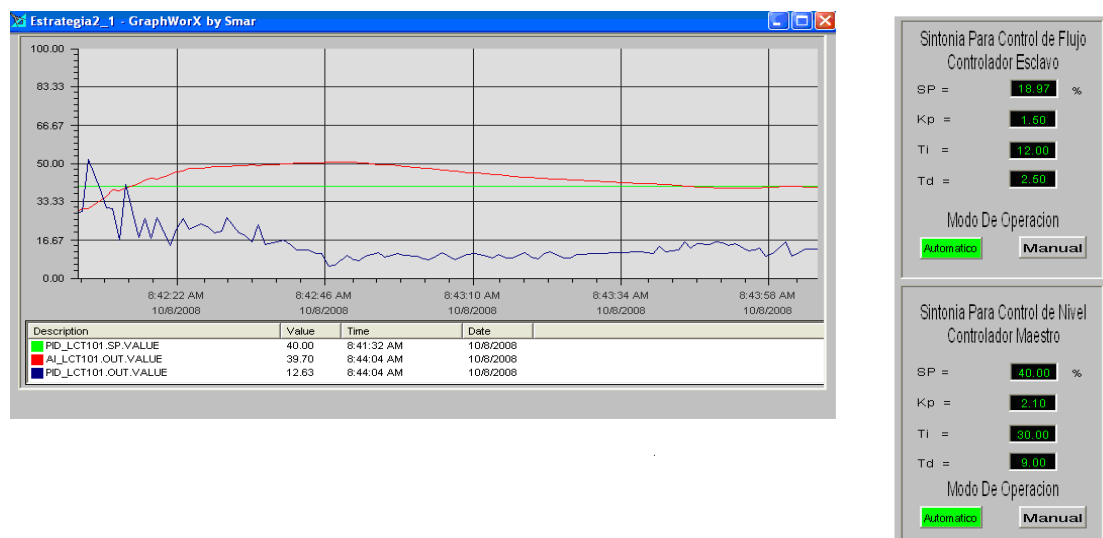


**Figura 47. Pantalla principal del sistema de supervisión**



En la siguiente figura podemos observar la respuesta del sistema en función del tiempo, a un SetPoint del 40%.

**Figura 48. Respuesta del sistema en la Estrategia 3**



**9.3.4. Criterios de desempeño.** Al igual que en la estrategia 1 y en la estrategia 2, en la estrategia 3 también se desea lograr y obtener la mejor eficiencia en cuanto al funcionamiento del controlador en cascada, para esto se realizó una aplicación la cual nos permite obtener los índices de desempeño del controlador. Ver anexo B.

Debido a que los controladores que se utilizaron en esta estrategia son los mismos que se usaron en las dos estrategias anteriores, ya disponemos de los parámetros de sintonía para los dos controladores.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de los índices de desempeño para esta estrategia de control y los valores de sintonía del controlador, incluyendo el sobrepaso, el error de estado estacionario y el tiempo de estabilización.

**Tabla15. Parámetros, criterios de desempeño de control de la estrategia 3**

CONTROLADOR	KP	TI	TD	ERR	MP	TSS	IAE	EFC
PID Nivel	2.1	9seg	30seg	0%	10%	45seg	14.17%	20%
PID Fluo	1.5	12seg	2.5seg	-	-	-	-	-

**9.3.5. Identificación del sistema.** También se logró obtener el modelo matemático y una estimación del sistema que se está controlando con la estrategia de control. **Ver anexo A**

## 10. CONCLUSIONES

- El poder implementar esta nueva tecnología en la planta didáctica para formación remota en control de procesos y sistemas computarizados, permitirá a los alumnos del sena de la especialidad (Tecnólogo en automatización y redes de comunicación industrial), poder realizar nuevas aplicaciones de control y automatización, que normalmente no se habían implementado en la planta. Además se podrán buscar, estudiar y discutir novedosas soluciones para automatización de procesos, dirigidas a las empresas e industrias de la región que deseen implementar esta nueva tecnología en sus procesos industriales.

En conclusión este proyecto permite incorporar la más moderna tecnología en el campo de la instrumentación y control de procesos industriales. Esta tecnología también la podemos denominar como solución abierta y estándar, no basada en un determinado sistema de control de un suministrador sino en una solución abierta soportada en los siguientes conceptos: Software Estándar y común para toda la Planta, Bus de Comunicaciones Estándar, e Instrumentos y Módulos de I/O inteligentes e interoperables. Todo esto es posible gracias a la flexibilidad que brinda el sistema implementado con dispositivos de campo que soportan el protocolo Foundation Fieldbus. Además en este proyecto vamos a poder implementar por primera vez en la planta los algoritmos de control en los dispositivos de campo en lugar de en un sistema Host central, que es lo que actualmente se ha venido implementando.

Uno de los aspectos más importantes de FOUNDATION Fieldbus es su habilidad de coleccionar y entregar grandes cantidades de información, no sólo variables de proceso y señales de control, sino también otros tipos de datos de los instrumentos y del proceso. Hace esto en forma consistente y confiable, mientras proporciona interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes y compatibilidad con el cableado existente.

Una de las afecciones que pueden tener los sistemas de comunicación industrial así como Fieldbus Foundation es que su robustez es mucho menor que la exigida en un ámbito industrial, es necesario modificarlo para adaptarlo a situaciones de humedad, polvo, vibración, golpes, calor o frío. Esto incluye no sólo los dispositivos de proceso, si no también el cable, conectores y barrera de seguridad. Pero el hecho de poder implementar las estrategias de control en los propios dispositivos de campo permite distribuir las funciones de control en toda la red interconectando a todos los equipos permitiéndoles el intercambio de todo tipo de información.

En este proyecto se mencionan las características funcionales del protocolo de comunicación industrial Fieldbus Foundation y se detallado su uso en diferentes modalidades del ambiente de trabajo, pudiendo ayudar a los profesionales de las empresas de la región para encontrar soluciones racionales y bien

encaminadas para los problemas de comunicaciones a los niveles de producción de una industria.

A partir de este trabajo se puede demostrar que existe ya en el mercado internacional los dispositivos encargados del funcionamiento de la un red Fieldbus Foundation, solo es necesario estudiar el proceso para así para arribar a la conclusión de que dispositivo o instrumento debemos comprar para sustituir la tecnología actualmente instalada en nuestra planta de proceso. La propuesta debe mejorar la confiabilidad y estabilidad del proceso productivo de una empresa.

- Gracias a la implementación de este sistema se pudieron realizar tres estrategias de control en la planta, las cuales demostraron que el poder distribuir toda la estrategia de control en los dispositivos de campo hace que el intercambio de datos de control por toda la red H1 sea mas eficiente, además se puede gestionar el estado de los equipos de campo indicando al mismo tiempo el estado de los controladores de cada estrategia. De esta manera se puede llevar una gestión y supervisión no solo del estado del hardware del sistema si no también del estado del software. Con todas estas ventajas el entorno de control industrial se hace mucha más fácil y eficiente para un operario.

Estas estrategias implementadas demuestran que el uso de este sistema puede llegar a tener mayores ventajas con respecto a otras tecnologías utilizadas para control de procesos continuos.

Durante la ejecución de las estrategias de control se tuvo que recurrir a enfoques experimentales para la sintonización de los parámetros PID.

El proceso que se utilizo para seleccionar u obtener los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de desempeño fue el método de Ziegler y Nichols, lo cual significaba establecer  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , basándose en un controlador totalmente proporcional llevando al sistema al borde de la estabilidad para determinar los parámetros  $K_u$  y  $T_u$ . De esta manera se sintonizaron los controladores de las estrategia implementadas.

Ya que este es el método mas utilizado en la sintonización de PID, se obtuvieron los índices de desempeño (EFC, IAE) de cada estrategia de control demostrándose la eficiencia del funcionamiento de los controladores para así mejorar los parámetros de control y obtener una mejor repuesta.

También se demostró que el utilizar un control en cascada permite mejorar los índices de desempeño en un 20%.

- En cuanto al sistema de supervisión, se demostró la interoperabilidad entre diferentes software gracias al OPC del System 302, debido a esto se pudo realizar el intercambio de datos de control entre el ProcessView y Matlab.

- Finalmente se concluye que las comunicaciones son cada día un factor muy importante en las empresas e industrias actuales; inicialmente se utilizaban solamente en la intercomunicación de los computadores personales con el fin de facilitar el trabajo en equipo y el uso de recursos informáticos de la empresa; posteriormente con los avances tecnológicos en electrónica, telecomunicaciones y computación, se empezaron a implementar estas redes a nivel de planta de producción, en donde se busca que estén intercomunicados dispositivos tales como: sensores, actuadores, PLCs, microcontroladores, máquinas, computadores, controladores, transmisores y en general todos los dispositivos involucrados en un sistema de automatización industrial o proceso; Con el fin de sincronizar todo el proceso de producción de una planta. Sin una red de comunicación industrial es imposible pensar en sistemas flexibles de manufactura o sistemas de procesos continuos, ya que el sistema flexible de manufactura o proceso tiene que monitorear todas las actividades involucradas en el proceso de producción y la única forma de hacer esto es por medio de un sistema de intercomunicación que me permita conectar: sensores, actuadores, PLC, computadores, microcontroladores, etc.; como lo es el Fieldbus Foundation.

## 11. RECOMENDACIONES

- Inicialmente sobre la planta didáctica ya se habían implementado otras tecnologías de redes de comunicación industrial para la realización de prácticas y proyectos donde se utilizaban estrategias de control básicas las cuales sirven de guía para la formación de los estudiantes que pertenecen al programa de formación de tecnólogos profesionales en Automatización Industrial del CEAI – SENA, se recomienda que se integre en los programas de formación en buses de campo la capacitación en buses de campo Fieldbus Foundation para los estudiantes y profesionales, ya que así se puede generar nuevas competencias laborales en los aprendices que se enfrenten a una industria moderna.
- Dado al concepto que introduce Fieldbus Foundation de “interoperabilidad”. Donde con este término se describe la capacidad que tienen los instrumentos de diferentes fabricantes de comunicarse entre si y operar en forma armoniosa. Cualquier instrumento de cualquier fabricante, cuando tenga el Logotipo de aprobación FOUNDATION TM Fieldbus, tiene la garantía de interoperar con cualesquier otro instrumento que también cuenten con esa aprobación. Gracias a esta ventaja en el mercado mundial existen variedad de dispositivos que pueden ser incorporados a la planta sin ninguna retribución de fabricante. De esta forma por medio de otros nuevos equipos e instrumentos que se incorporen a la planta, se pueden realizar o desarrollar otros tipos de prácticas y actividades donde se tengan que diseñar nuevas estrategias control sobre la planta, con el fin de que esta plataforma de formación se asemeje mas a un entorno industrial donde los estudiantes, profesionales técnicos, tecnólogos e ingenieros puedan reforzar y fomentar los conocimientos generales que se deben de tener a la hora de enfrentarse a los nuevos avances tecnológicos en los pertinente a las comunicaciones industriales para el control de sistemas y procesos continuos.
- Debido a la disposición de la planta para los estudiantes y profesionales investigadores, se recomienda que se puedan implementar otro tipo de tecnologías las cuales sirvan y se utilicen para encontrar y estudiar nuevas soluciones de automatización y control que se puedan llevar a cabo e implementar en las empresas e industrias de la región, y Asia poder mejorar la calidad y eficiencia de los procesos de nuestras industrias.

## BIBLIOGRAFÍA

BT302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008 [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/BT302ME.PDF>

DFI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008 [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/DFI302ME.PDF>

FBLCLAFFME [en Línea]. Sao Paulo, Brasil: Smar, 2006. [Consultado el 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/FBLCLAFFME.PDF>

FI302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2008 [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/FI302ME.pdf>

FEBLES ÁLVAREZ, Ariel y GARCÍA BLANCO, Miguel Ángel. Control de planta piloto con Fieldbus Foundation [en línea]. España: Universidad de Valladolid, 2005, [Consultado el 10 de Noviembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXIX/pdf/208.pdf>

FERNÁNDEZ, José Juan. Foundation Fieldbus y su aplicación a la alta velocidad HSE [en línea]. Sao Paulo: ETSI de Telecomunicaciones de Vigo, 2005. [Consultado el 30 de octubre del 2008]. Disponible en Internet: [http://www.peirao.com/data/comun/documentos/jj/foundation\\_hse.pdf](http://www.peirao.com/data/comun/documentos/jj/foundation_hse.pdf)

Foundation Fieldbus Technical Overview [en Línea]. Austin: Fieldbus Foundation, 2008. [Consultado el 3 de octubre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.pacontrol.com/download/foundation-fieldbus-overview.pdf>

HERNANDEZ YANTÁ, Orellys Felicia. Interconexión de la Red de Computadoras con la Red Industrial Fieldbus Foundation [en línea]. Lima: ISA Peru, 2005. [Consultado el 30 de octubre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.cujae.edu.cu/eventos/cittel/trabajos/Trabajos/Comision%202/CITTE L-32.pdf>

KASCHEL, Héctor y PINTO, Ernesto. Análisis del estado del arte de los buses de campo aplicados al control de procesos industriales [en línea]. Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile, 2003. [Consultado el 6 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://cabierta.uchile.cl/revista/19/articulos/pdf/edu3.pdf>

LD302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2005 [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/LD302ME.PDF>

MACKAY Steve. Foundation Fieldbus High Speed Ethernet (HSE) and TCP/IP. IDC Technologies [en línea]. Australia, Perth : IDC Technologies, 2008. [Consultado el 23 de marzo del 2008]. Disponible en Internet: [http://www.iceweb.com.au/ffeuca/papers/JAPerth/03\\_FF\\_H1\\_and\\_Ethernet\\_TCP\\_IP.pdf](http://www.iceweb.com.au/ffeuca/papers/JAPerth/03_FF_H1_and_Ethernet_TCP_IP.pdf)

System302 [en línea]. Sao Paulo Brasil: SMAR, 2003. [Consultado 5 de septiembre de 2008]. Disponible en Internet: [www.smar.com/PDFs/Catalogues/SYSTEM32CS.pdf](http://www.smar.com/PDFs/Catalogues/SYSTEM32CS.pdf) System302

TEJADA MUÑOZ, Guillermo. Tutorial de Fieldbus [en línea]. Lima – Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2007. [Consultado el 20 de agosto del 2008]. Disponible en Internet: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb\\_1998/Pdf/04\\_tut.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/electronica/Setiemb_1998/Pdf/04_tut.pdf)

TT302ME [en Línea]. Brasil: Smar, 2007 [Consultado 25 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://www.smar.com/PDFs/Manuals/TT302ME.PDF>

Wikipedia: la enciclopedia libre [en línea]: Cable de categoría. Florida: Wikipedia Foundation, 2008. [Consultado el 28 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Cable\\_de\\_Categor%C3%ADa\\_6](http://es.wikipedia.org/wiki/Cable_de_Categor%C3%ADa_6)

\_\_\_\_\_ [en línea]: Fieldbus. Florida: Wikipedia Foundation, 2008. [Consultado el 9 de septiembre del 2008]. Disponible en Internet: <http://en.wikipedia.org/wiki/Fieldbus>



## ANEXOS

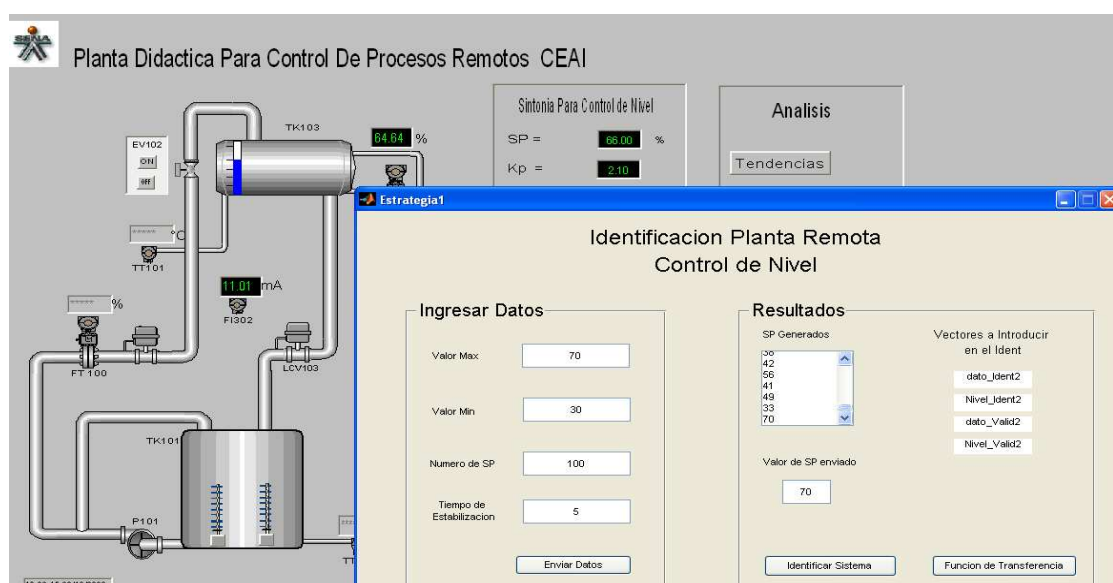
### Anexo A. Identificación del sistema

Como ya se dijo antes cada interfaz grafica de la estación de supervisión de cada estrategia dispone de un botón de identificación del sistema. Este botón permite ejecutar un archivo .exe, el cual ejecuta una aplicación diseñada en Matlab, que nos permitirá realizar una comunicación vía OPC y así poder acceder a las todas las variables que se manejan en el SYSCON o en la estrategias de control, esto se realiza con el fin de poder manipular estos datos y a partir de ellos lograr identificar o modelar el sistema representándolo en una función de transferencia y también poder obtener los índices de desempeño del controlador, en este caso del controlador de la estrategia 2.

Para lograr realizar y obtener la identificación y modelamiento del sistema, esta aplicación hace uso de la herramienta Ident de Matlab, a la cual se le deben ingresar datos de validación e identificación, los cuales son tomados de las variables de entrada y salida del sistema sobre el cual corre la estrategia de control.

Con el fin de obtener estos datos, dicha aplicación permite enviar una determinada cantidad de datos de SetPoint, para que así se generen los vectores que se deben ingresar a la herramienta Ident. En la siguiente figura se muestra como se capturan los datos de la estrategia de control desde la aplicación realizada en Matlab.

**Figura 49. Envío y captura de datos para validación del sistema de la estrategia 2**

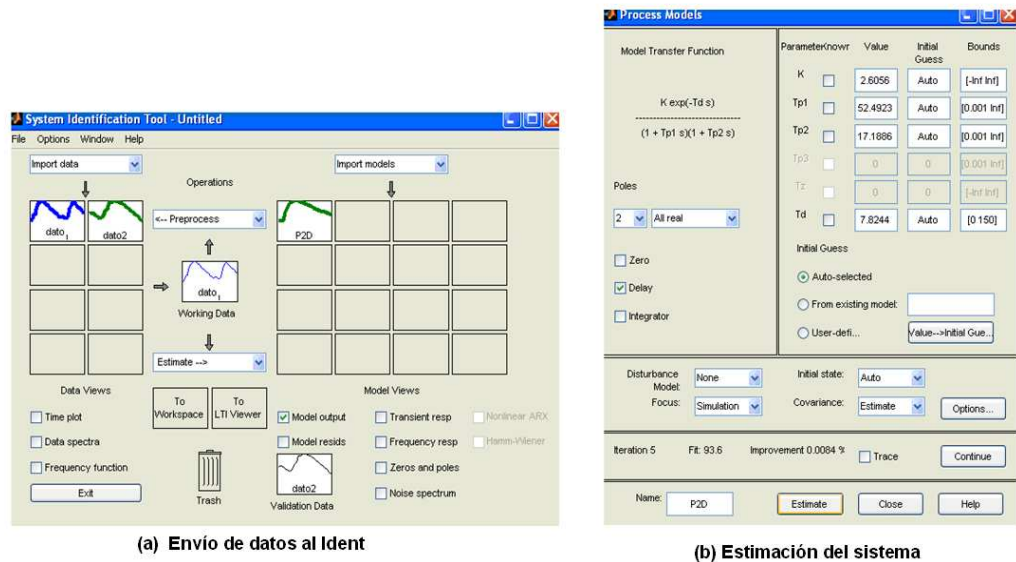


Ahora ya con los datos obtenidos (dato\_Ident2, Nivel\_Ident2, dato\_Valid2, Nivel\_Valid2), estos se importan a la herramienta Ident para poder estimar el

sistema y modelarlo en una función de transferencia, con la libertad de poder indicar el orden del sistema, retardos y datos de sintonía con el fin de obtener una mayor aproximación.

En la siguiente figura se muestra la configuración para realizar una estimación deseada del sistema.

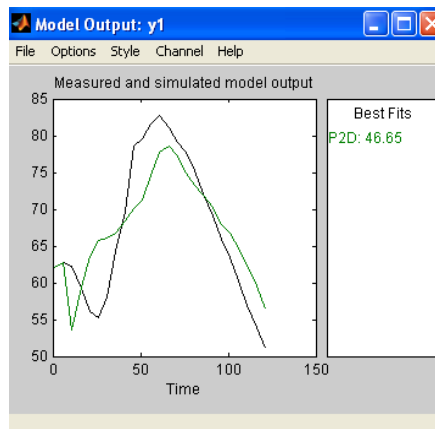
**Figura 50. Configuración del Ident para la estimación del sistema**



Después de haber estimado el sistema, se puede observar por medio de una grafica que tan aproximado fue la estimación de este con respecto a las señales obtenidas del propio sistema.

La línea negra indica la señal propia del sistema mientras que la línea verde representa la estimación.

**Figura 51. Modelo de salida**



Finalmente obtenemos la función de transferencia la cual nos representa la repuesta del sistema a diferentes señales de entrada lo cuales se representaron como SetPoints.

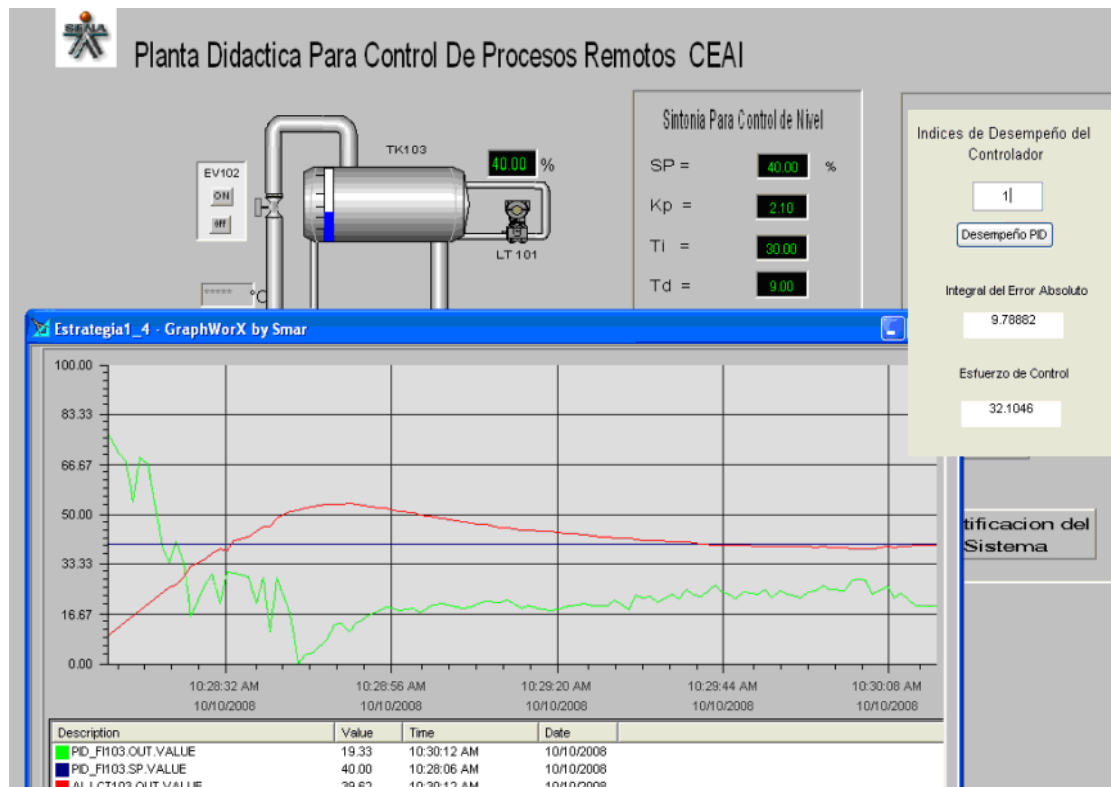
Transfer function from input "u1" to output "y1":

$$\exp(-7.82*s) * \frac{0.002888}{s^2 + 0.07723 s + 0.001108}$$

## Anexo B. Indices de desempeño

Después de haber obtenido la estimación del sistema utilizando el controlador de la estrategia 2, se dispone a establecer y obtener los índices de desempeño del mismo, tales como: la Integral del error absoluto (IAE) y el esfuerzo de control (EFC).

**Figura 52. Índices de desempeño del controlador de la estrategia 2**



En la figura 53, muestra como responde el sistema de la estrategia 2, a una entrada de SetPoint = 40%. El grafico de tendencia muestra que la respuesta del sistema tiene un sobrepaso y luego este se estabiliza. Con los índices de desempeño se indica en valores de porcentaje que tan eficiente es el controlador que estamos utilizando en la estrategia 2 para controlar el nivel del estanque 4.

Para obtener los valores del IAE y el EFC se utilizaron las siguientes formulas:

$$EFC = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N |Out|$$

$$IAE = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N |Error|$$

Donde:

Error: señal de error del controlador

Out: Salida del controlador

De esta manera con estos índices de desempeño, podemos ajustar mejor los parámetros del controlador y así obtener un mejor desempeño del mismo.

Para las demás estrategias de control el calculo de los índices de desempeño se obtienen de la misma forma como se obtuvieron para la estrategia 2.